

IDF 2018

Incontri di Fisica 2018, XVIII Edizione, LNF 10 - 12 ottobre 2018

Fisica delle particelle e Modello Standard

Barbara Mele



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Sezione di Roma)

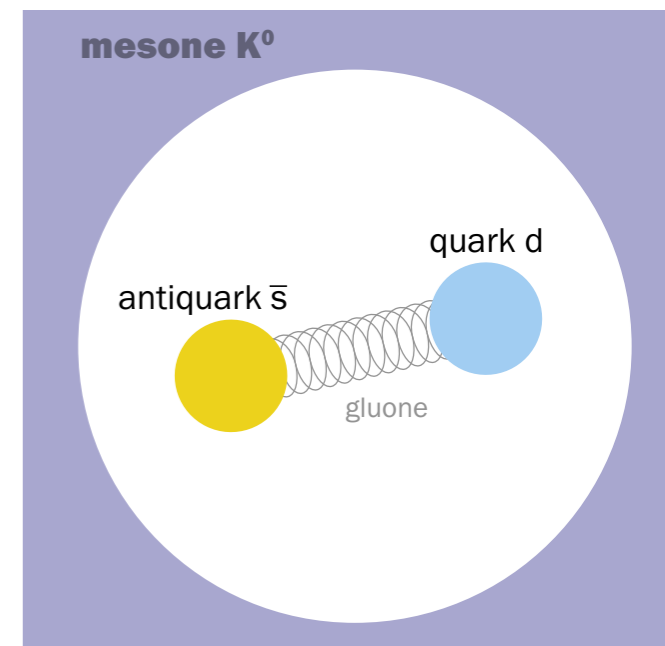
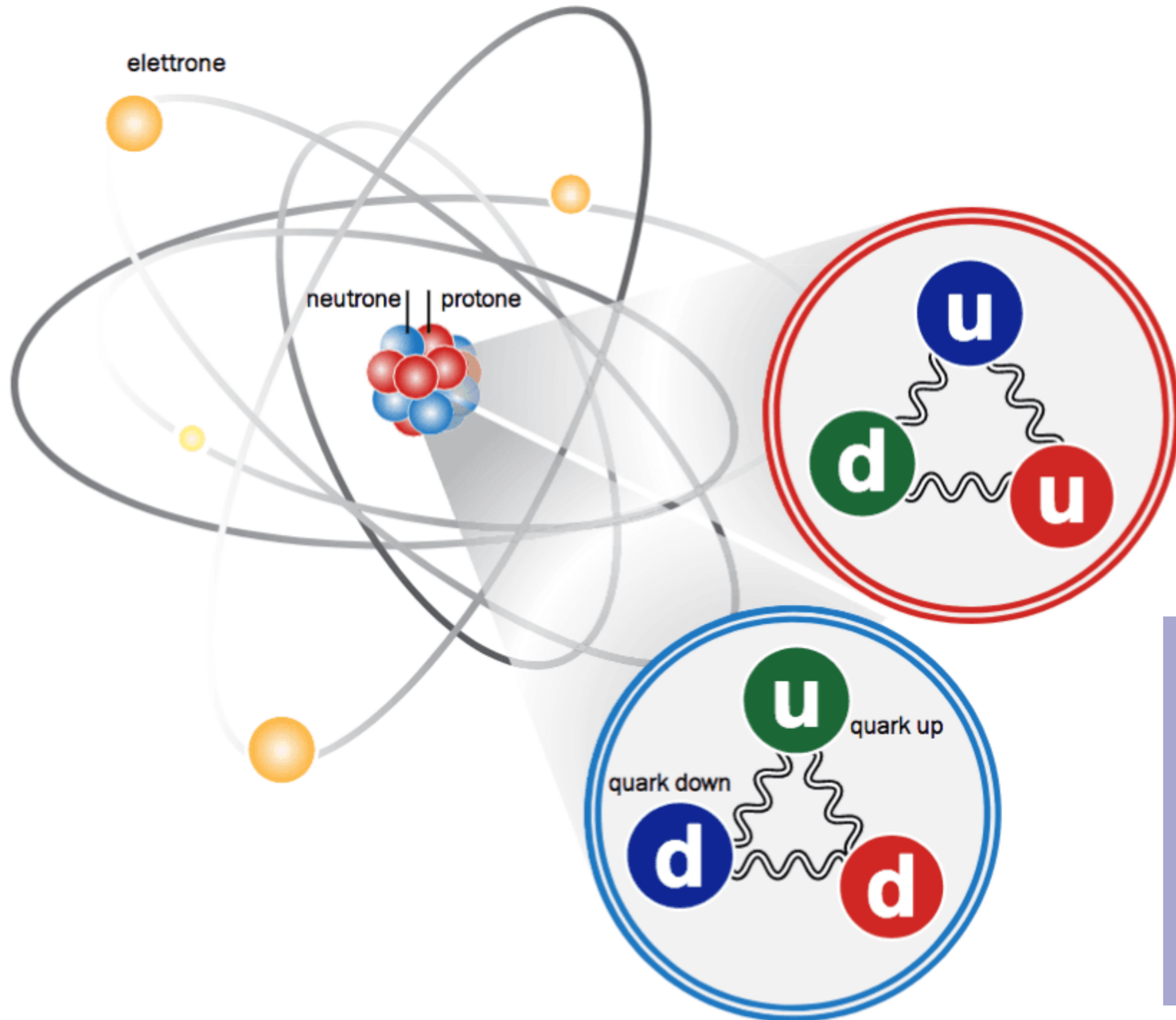
INFN : campi di interesse

- * **costituenti fondamentali della materia**
- * **interazioni fondamentali**
- * **loro manifestazioni in laboratorio (→ fisica agli acceleratori)
e/o in fenomeni naturali sulla terra
e/o nel cosmo**
- * **applicazioni tecnologiche delle scoperte**

**INFN →→→ fisica delle particelle (High Energy Physics)
e non solo !**

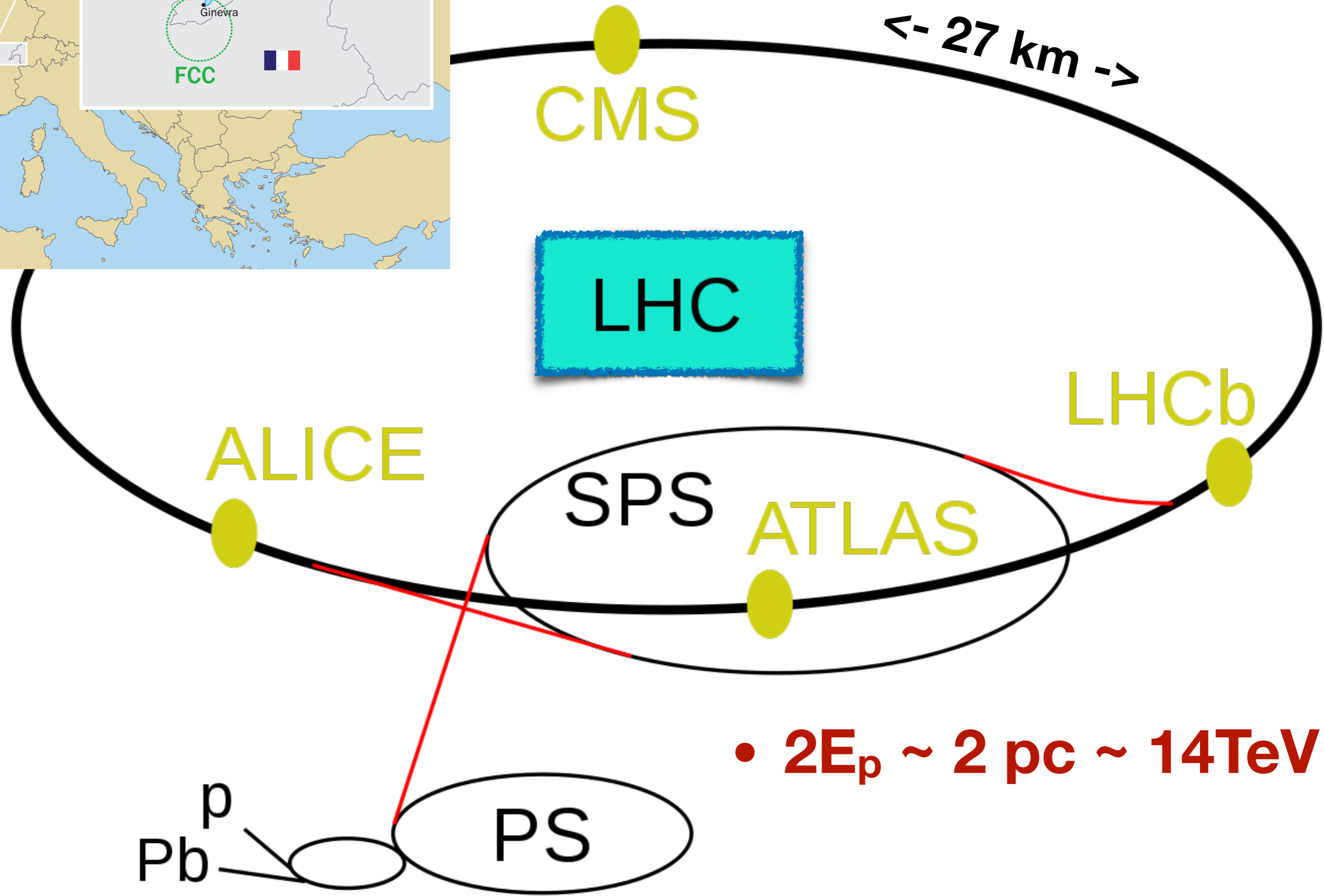
<https://www.asimmetrie.it/>

Fisica delle “particelle elementari”





energia persa in **radiaz. di sincrotrone**
da p.lla carica curvata in campo magnetico $\Delta E \sim \left(\frac{E}{m}\right)^4 \times \frac{1}{R}$



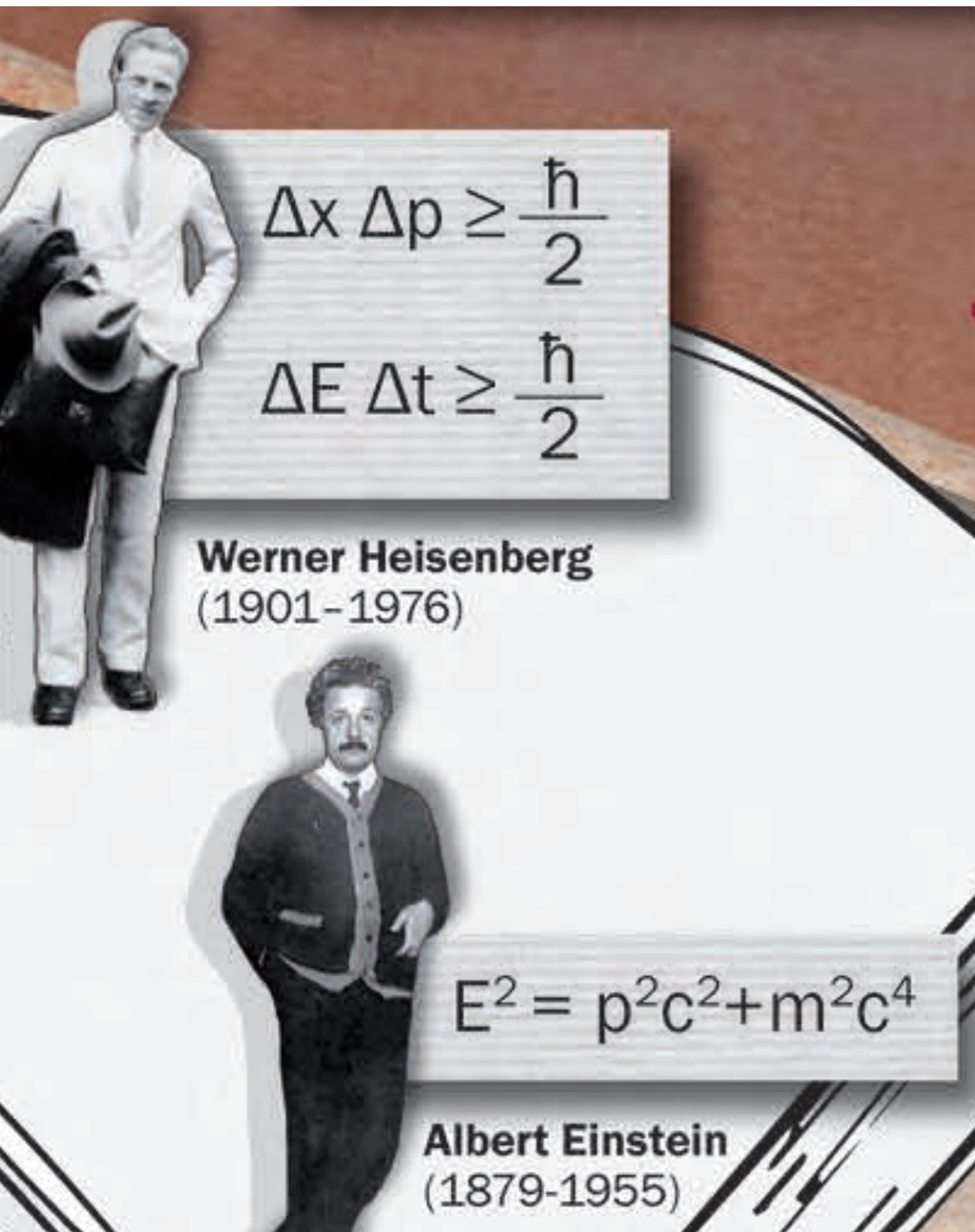
• $2E_p \sim 2 \text{ pc} \sim 14\text{TeV}$

da tenere a mente :

- la fisica fondamentale ha lo scopo di ridurre tutti i fenomeni naturali a un insieme di leggi e teorie che possano predire e/o spiegare quantitativamente tutte le osservazioni sperimentali
- a livello microscopico tutta la fenomenologia della materia e della radiazione (compresa la fisica molecolare, atomica, nucleare e subnucleare) può essere spiegata oggi in termini di tre classi di interazioni fondamentali:
interazioni forti, elettromagnetiche e deboli.
- per tutti i corpi materiali sulla Terra e in tutti i fenomeni geologici, astrofisici e cosmologici una quarta interazione, la forza gravitazionale, svolge un ruolo *dominante* (che è invece trascurabile nella fisica atomica e nucleare).

- a livello **microscopico** tutte le interazioni si possono descrivere mediante le leggi della **meccanica quantistica** e della **relatività speciale**

$$\begin{aligned} \hbar/2\pi &\sim 6.6 \times 10^{-22} \text{ MeV s} \\ c \hbar/2\pi &\sim 197 \text{ MeV fm} \\ c &\sim 300.000 \text{ km s}^{-1} \end{aligned}$$



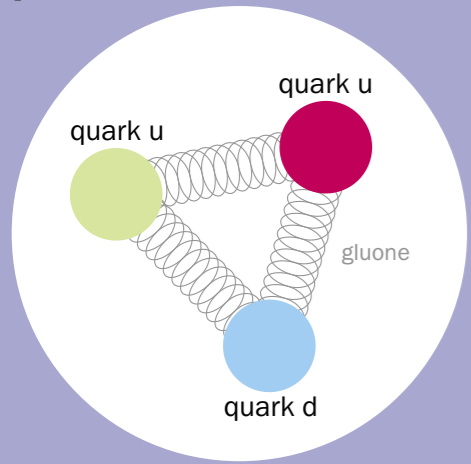
- per studiare particelle con **dimensioni spaziali** dell'ordine Δx o **interazioni a distanze** dell'ordine Δx , occorre come sonda un fascio di particelle in un acceleratore con impulso :

$$p \gtrsim \hbar / \Delta x$$

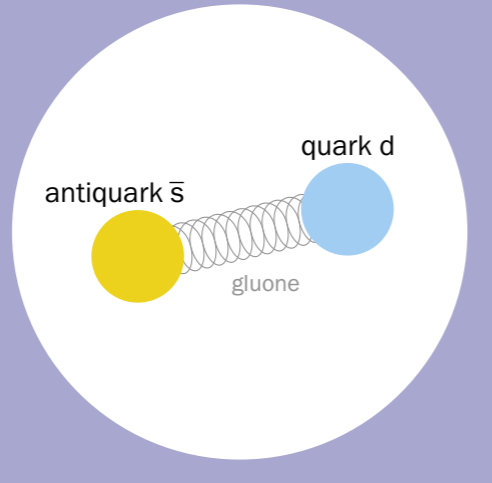
- a LHC , con $2E_p \sim 2 \text{ pc} \sim 14 \text{ TeV}$, si possono sondare distanze dell'ordine $\Delta x \sim 10^{-17} \text{ cm}$! (cf. dimensioni atomiche $\sim 10^{-8} \text{ cm}$)

proliferazione di particelle !

protone

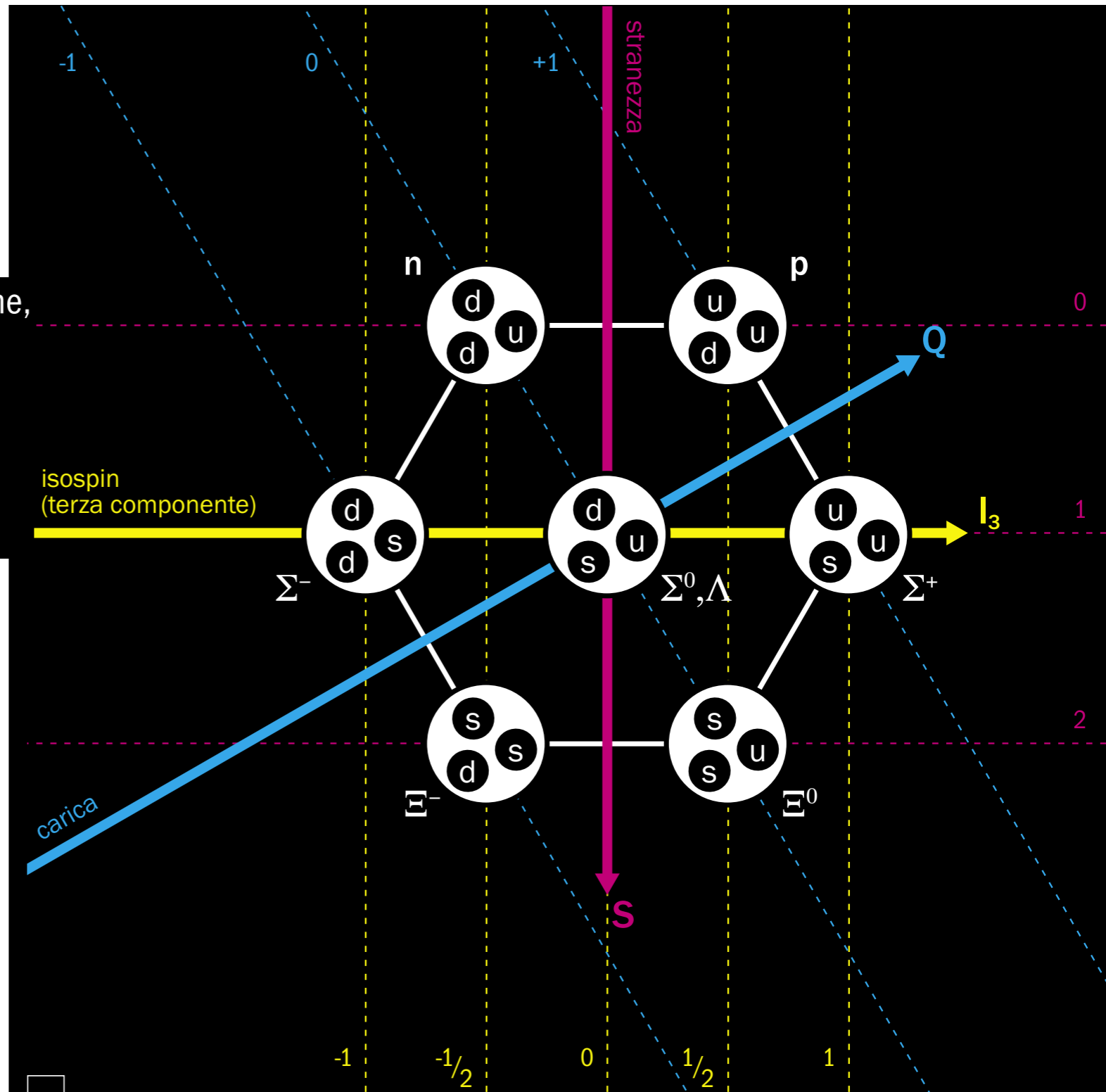


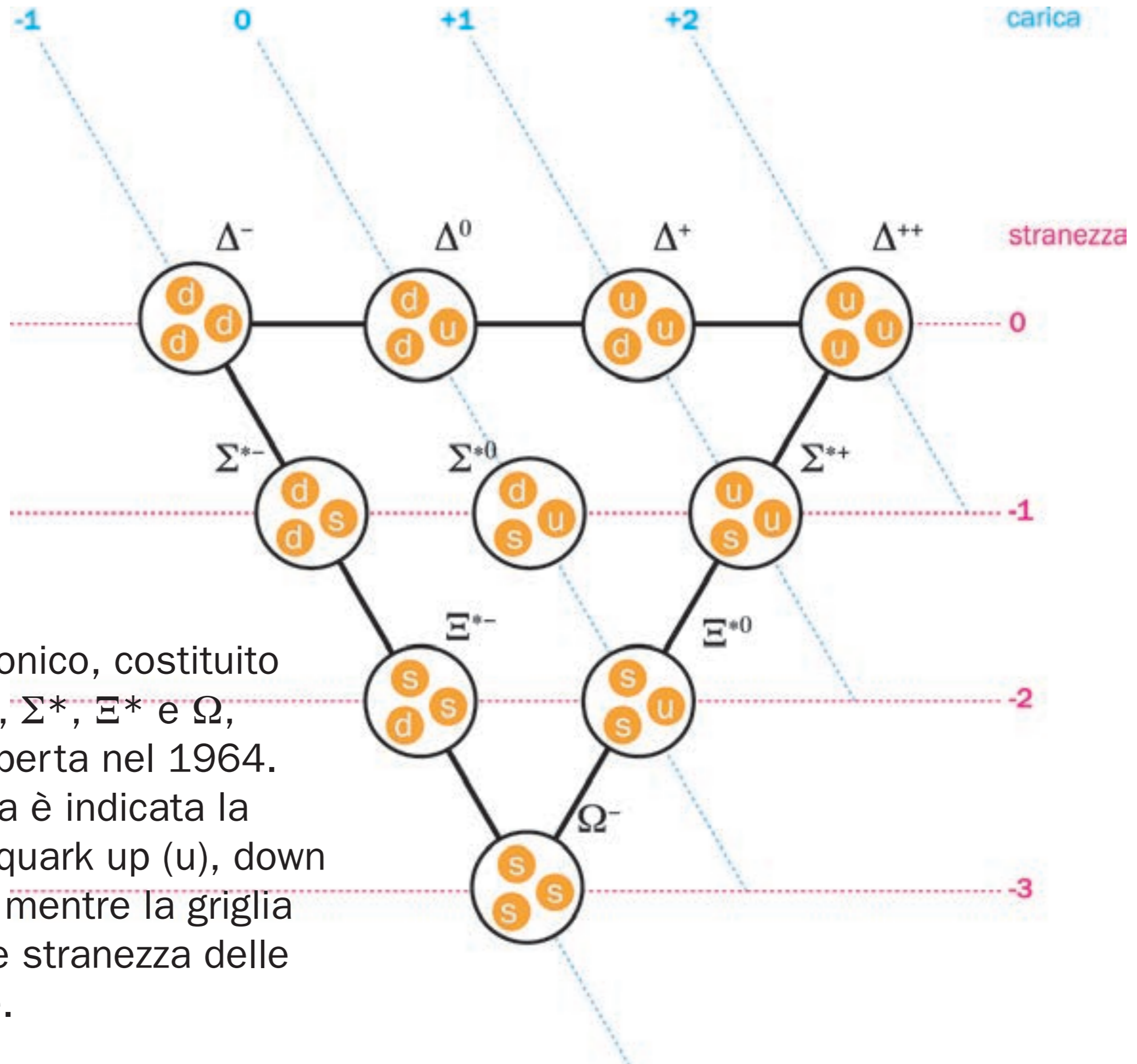
mesone K⁰



L'ottetto barionico che raccoglie i barioni leggeri (il neutrone, il protone e le particelle lambda, csi e sigma) secondo il modello a tre quark. I tre assi colorati sono legati ai tre numeri quantici caratteristici delle diverse particelle (la terza componente dell'isospin I_3 sull'asse x, la stranezza S sull'asse y e la carica Q sull'asse inclinato).

n	neutrone
p	protone
Σ	particelle sigma
Λ	particelle lambda
Ξ	particelle csi
u	quark up
d	quark down
s	quark strange






Il decupletto barionico, costituito dalle particelle Δ , Σ^* , Ξ^* e Ω , quest'ultima scoperta nel 1964. Per ogni particella è indicata la composizione in quark up (u), down (d) e strange (s), mentre la griglia identifica carica e stranezza delle diverse particelle.

STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES

Q
U
A
R
K
S

UP
 mass $2,3 \text{ MeV}/c^2$
 charge $\frac{2}{3}$
 spin $\frac{1}{2}$




CHARM
 mass $1,275 \text{ GeV}/c^2$
 charge $\frac{2}{3}$
 spin $\frac{1}{2}$



TOP
 mass $173,07 \text{ GeV}/c^2$
 charge $\frac{2}{3}$
 spin $\frac{1}{2}$




DOWN
 mass $4,8 \text{ MeV}/c^2$
 charge $-\frac{1}{3}$
 spin $\frac{1}{2}$



STRANGE
 mass $95 \text{ MeV}/c^2$
 charge $-\frac{1}{3}$
 spin $\frac{1}{2}$



BOTTOM
 mass $4,18 \text{ GeV}/c^2$
 charge $-\frac{1}{3}$
 spin $\frac{1}{2}$



L
E
P
T
O
N
S

ELECTRON
 mass $0,511 \text{ MeV}/c^2$
 charge -1
 spin $\frac{1}{2}$




MUON
 mass $105,7 \text{ MeV}/c^2$
 charge -1
 spin $\frac{1}{2}$



TAU
 mass $1,777 \text{ GeV}/c^2$
 charge -1
 spin $\frac{1}{2}$



ELECTRON NEUTRINO
 mass $<2,2 \text{ eV}/c^2$
 charge 0
 spin $\frac{1}{2}$



MUON NEUTRINO
 mass $<0,17 \text{ MeV}/c^2$
 charge 0
 spin $\frac{1}{2}$



TAU NEUTRINO
 mass $<15,5 \text{ MeV}/c^2$
 charge 0
 spin $\frac{1}{2}$




spin=1/2


GLUON
 mass 0
 charge 0
 spin 1




PHOTON
 mass 0
 charge 0
 spin 1



Z BOSON
 mass $91,2 \text{ GeV}/c^2$
 charge 0
 spin 1



W BOSON
 mass $80,4 \text{ GeV}/c^2$
 charge ± 1
 spin 1



spin=1

HIGGS BOSON
 mass $126 \text{ GeV}/c^2$
 charge 0
 spin 0

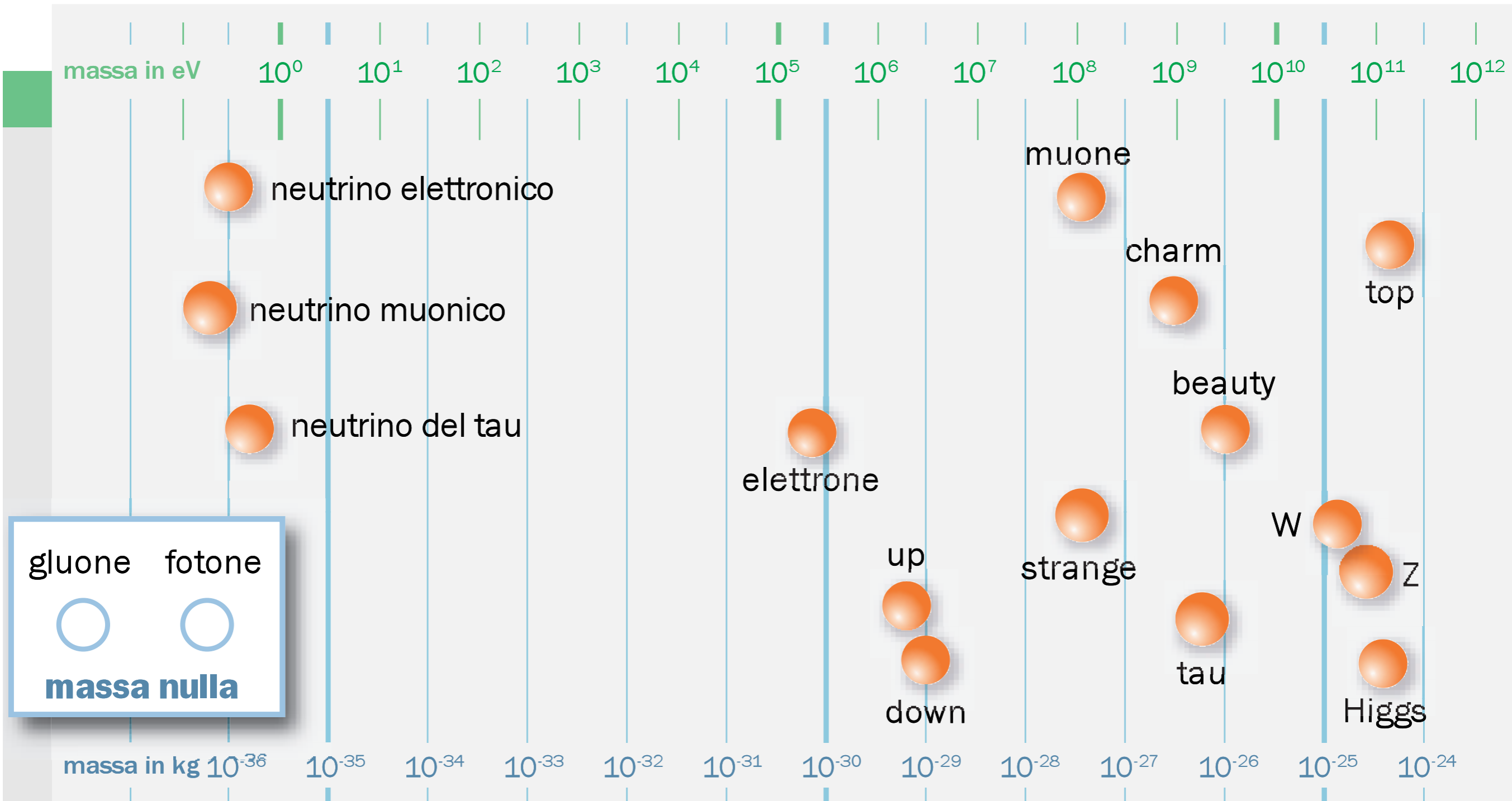


spin=0

G
A
U
G
E
B
O
S
O
N
S

(MEDIATORI)

masse delle particelle



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \mu_0 \vec{j}\end{aligned}$$

Erwin Schrödinger
(1887-1961)

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$

Paul Dirac
(1902-1984)

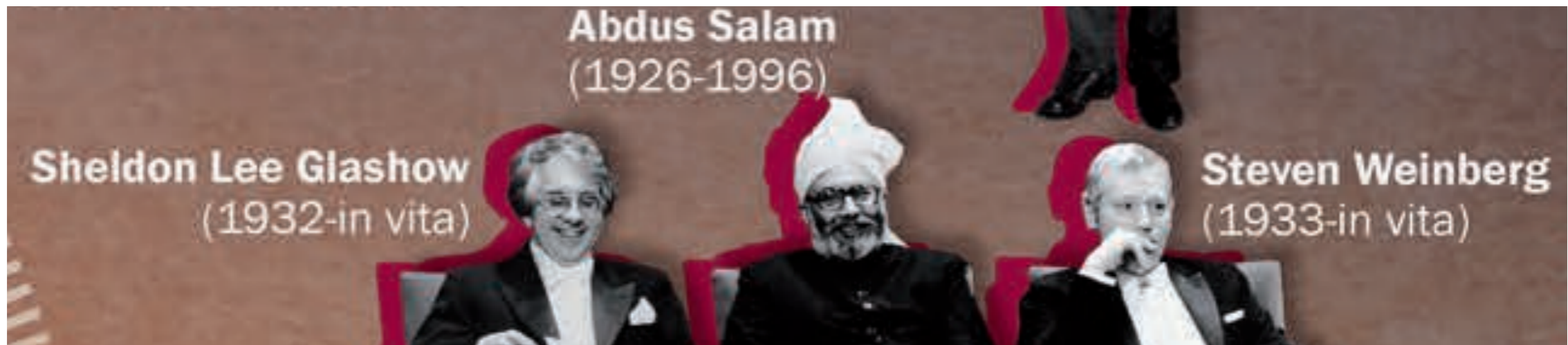
$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

*principi
di simmetria*

*simmetrie
spazio-temporali*

*simmetrie
di gauge*

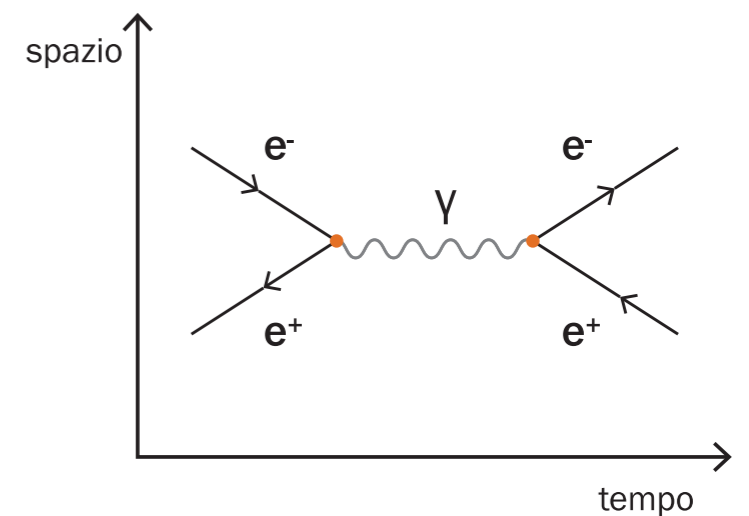
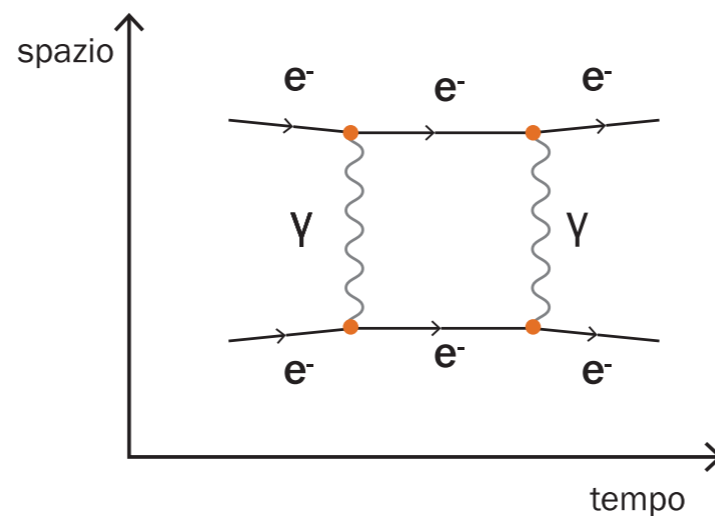
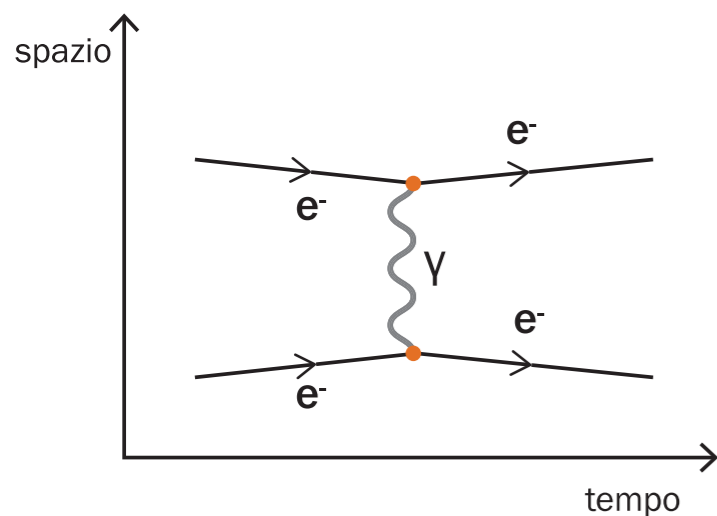
*leggi di
conservazione*
energia
quantità di moto
momento angolare
carica elettrica
...

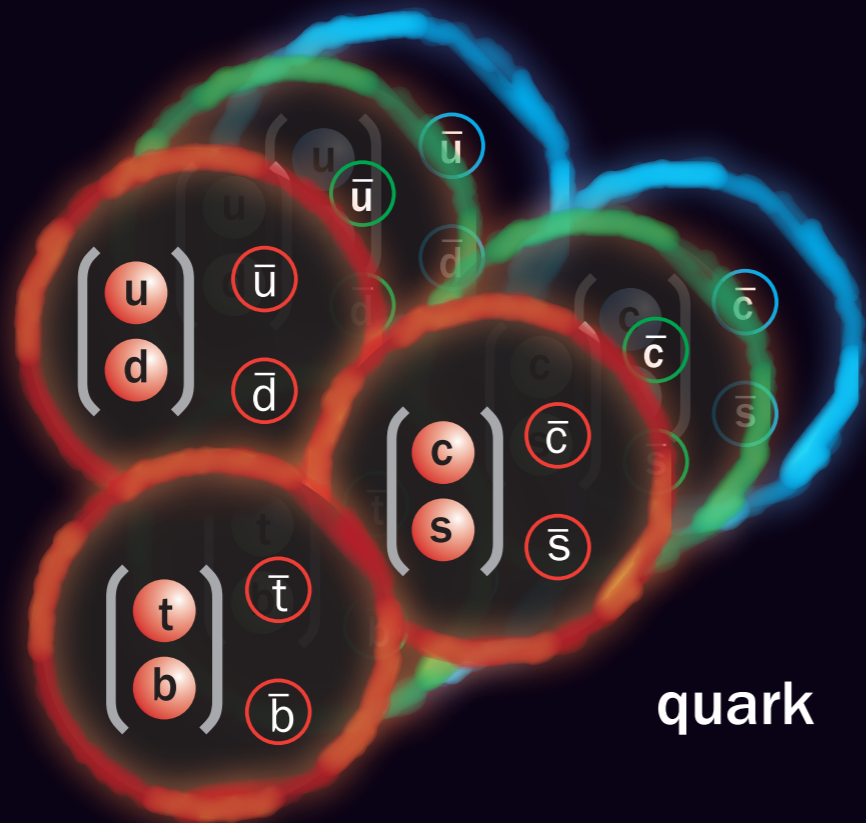


→ *Lagrangiana del Modello Standard*


$$L = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{\partial} \psi + h.c. + \psi_i y_{ij} \psi_j \Phi + h.c. + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)$$

$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$

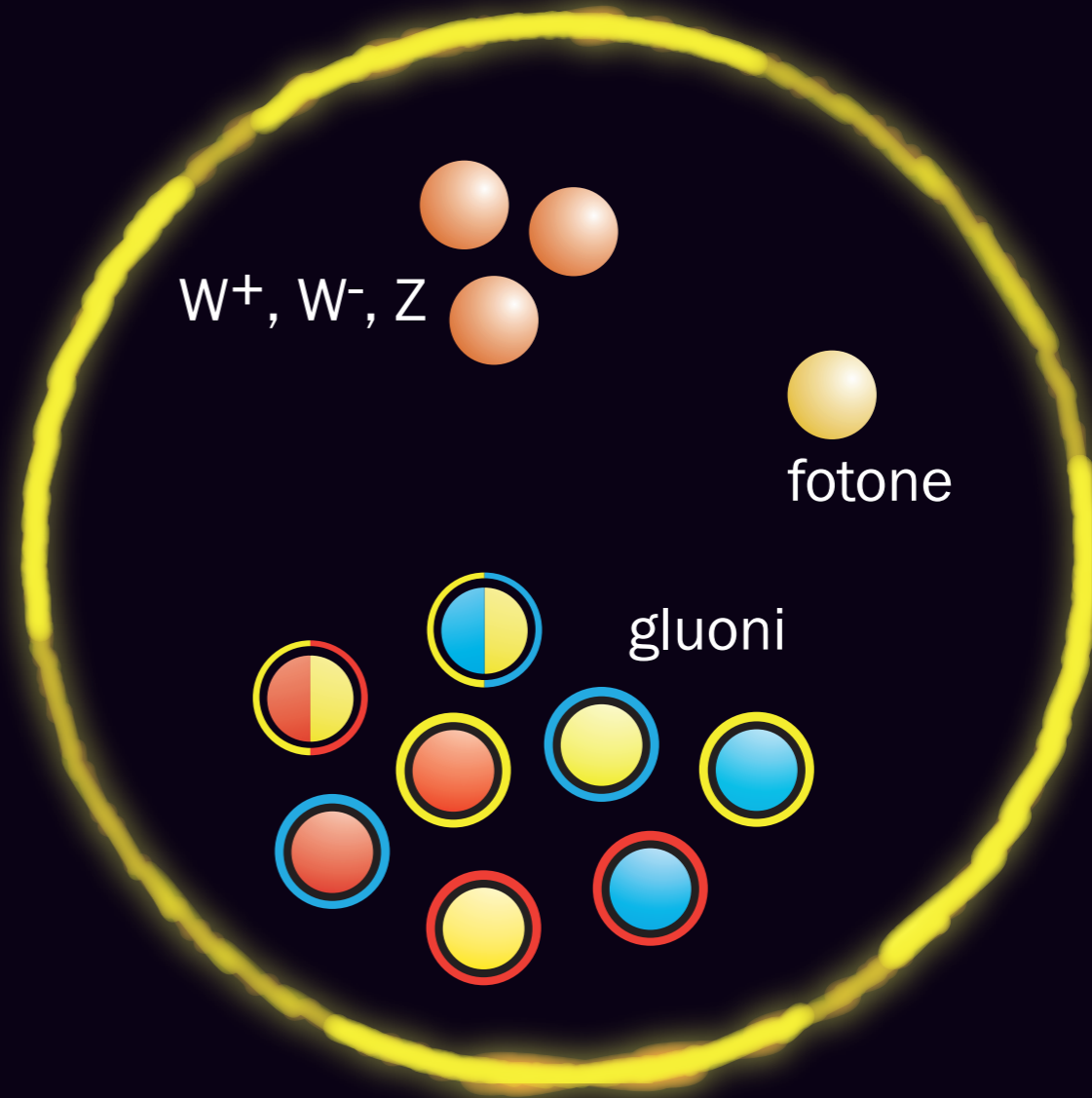











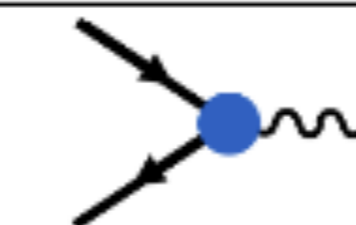

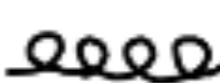





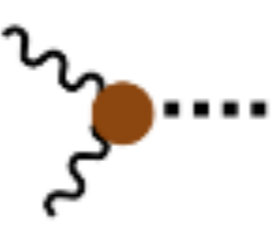
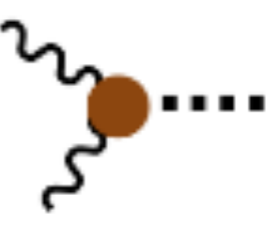
quark

 bosone di Higgs

bosoni mediatori



leptoni

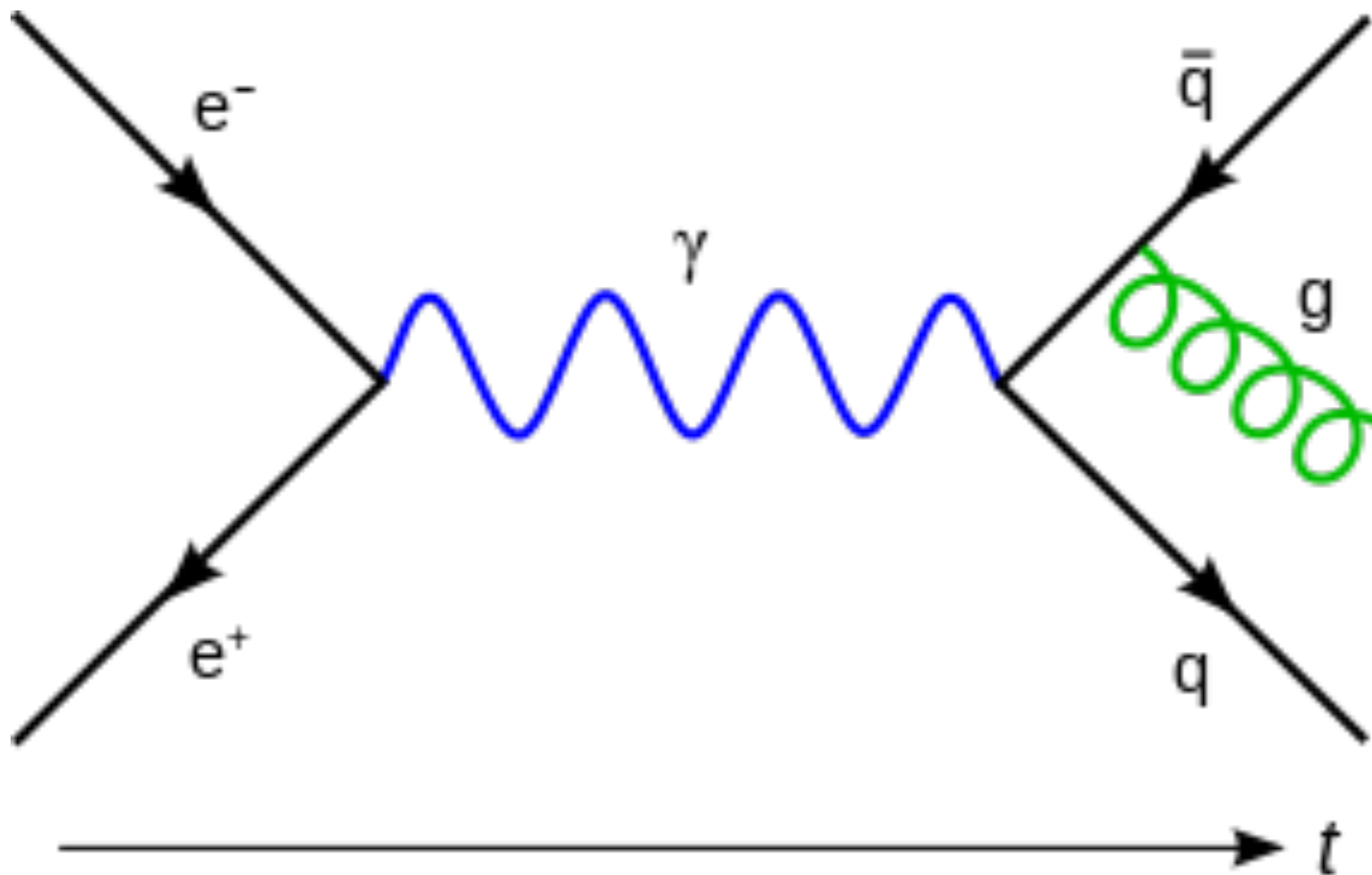
γ 	 $q\bar{q}\gamma$ $l^-l^+\gamma$	 $W^+W^-\gamma$	
Z 	 $q\bar{q}Z$ l^-l^+Z	 W^+W^-Z	
W^{+-} 	 $q\bar{q}'W$ $l\nu W$		 $WWWW$
g 	 $q\bar{q}g$	 ggg	 $gggg$
h 	 $q\bar{q}h$ l^-l^+h	 W^+W^-h	 ZZh

Lagrangiana del Modello Standard

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\Psi}\not{D}\psi \\ & + D_{\mu}\Phi^{\dagger}D^{\mu}\Phi - V(\Phi) \\ & + \bar{\Psi}_L\hat{Y}\Phi\Psi_R + h.c.\end{aligned}$$

descrive tutti i fenomeni che osserviamo oggi nelle collisioni di alta energia ... (e non solo !)

Rappresentazione semplice/pulita in collisioni e^+e^-

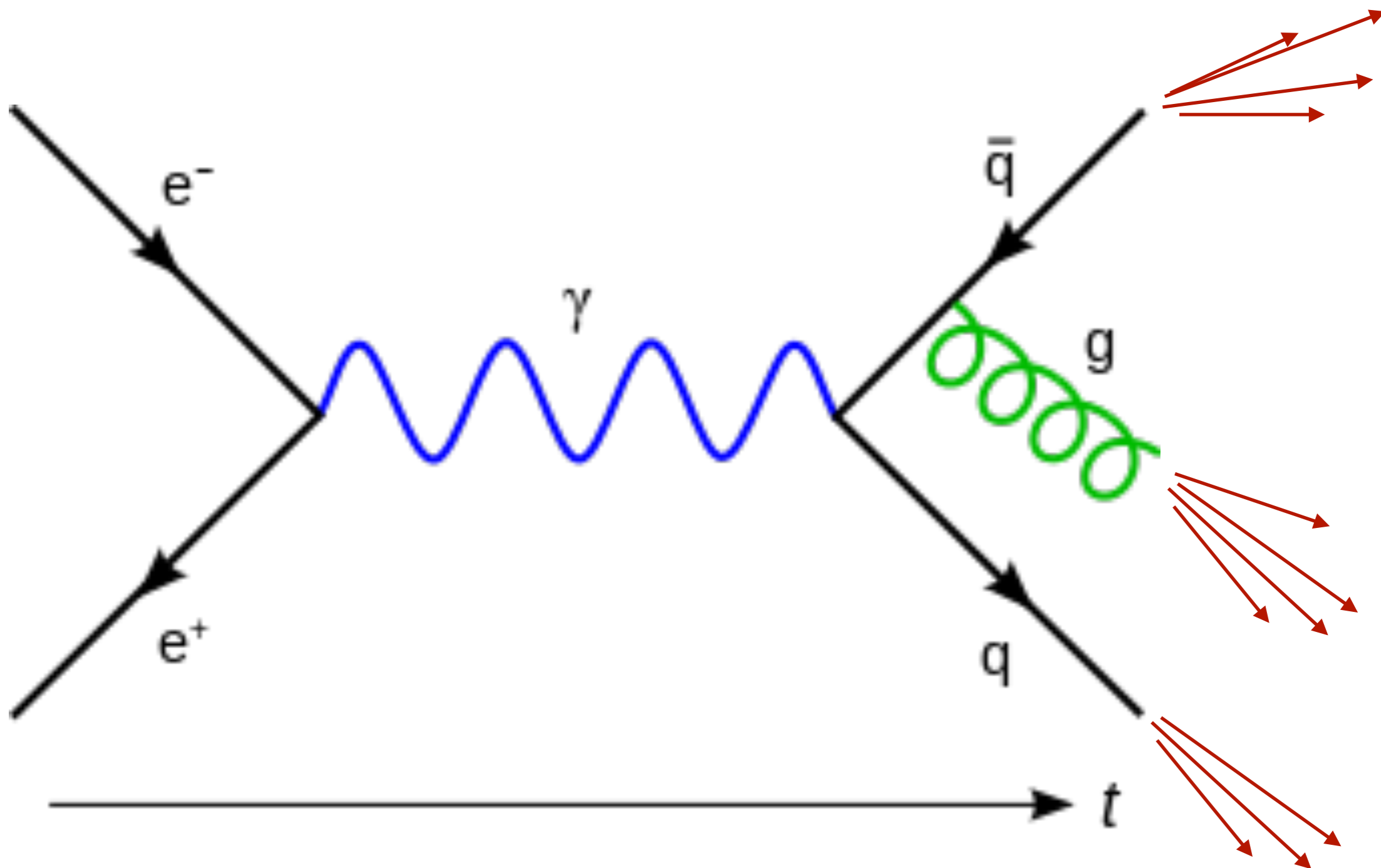


**i quark liberi non possono essere
osservati !**

**si combinano in particelle neutre
per carica di colore
(mesoni, barioni)**

prima di poter essere rivelati

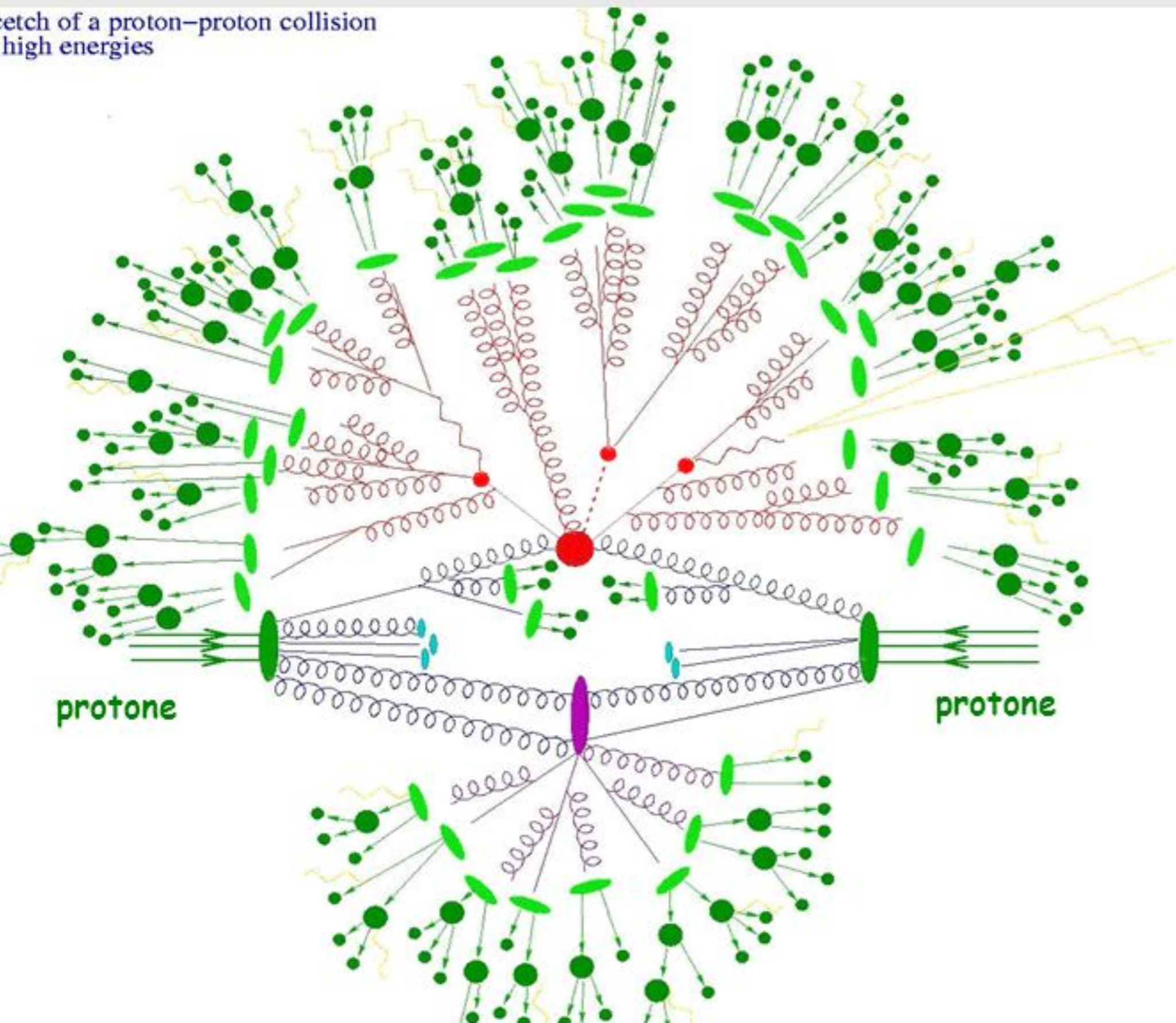
Rappresentazione semplice/pulita in collisioni e^+e^-



Interazioni p-p @ LHC



Sketch of a proton-proton collision
at high energies



Interazione principale

ISR e FSR

Creazione dei Jet

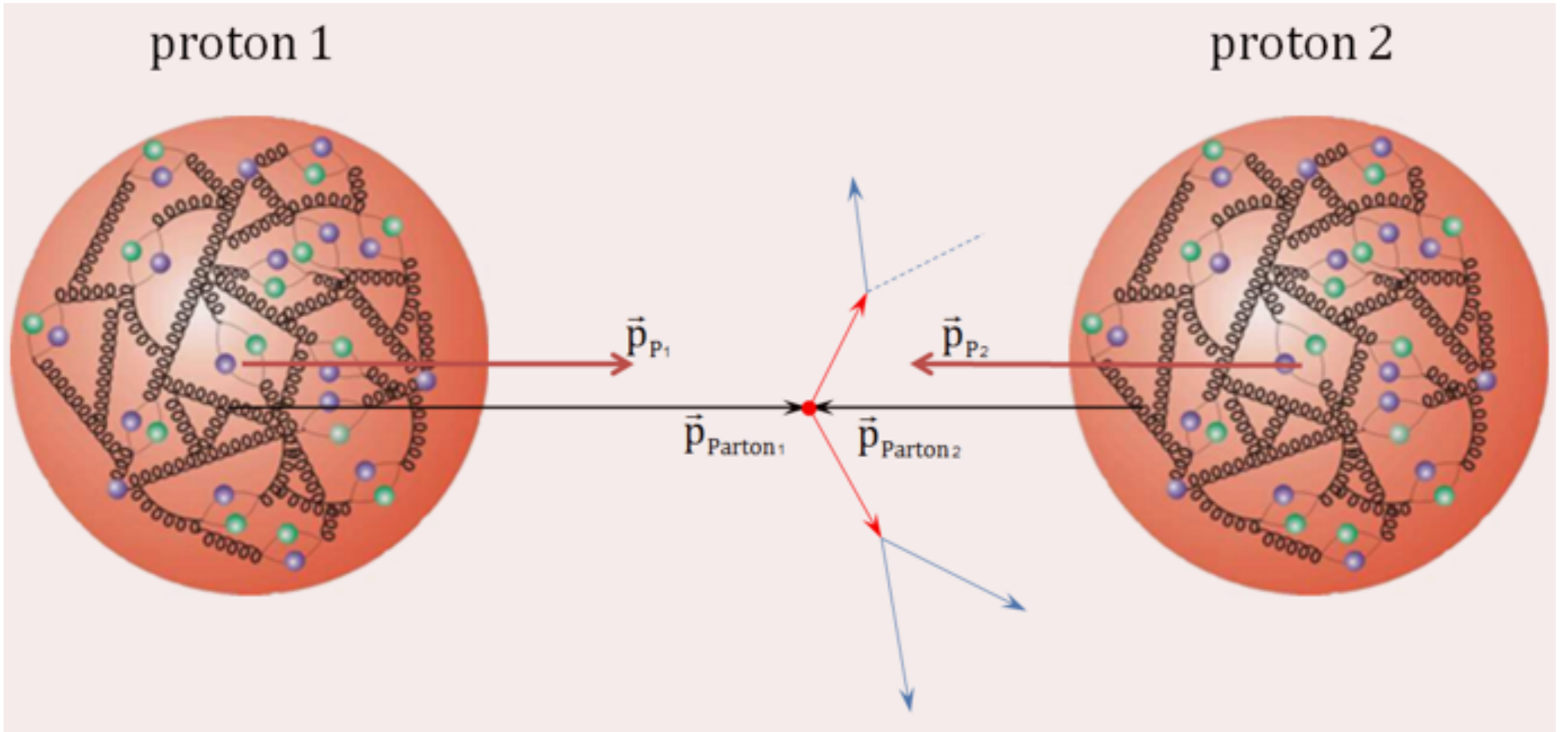
Frammentazione e
Adronizzazione

MPI

Beam Remnant

Ambroglini

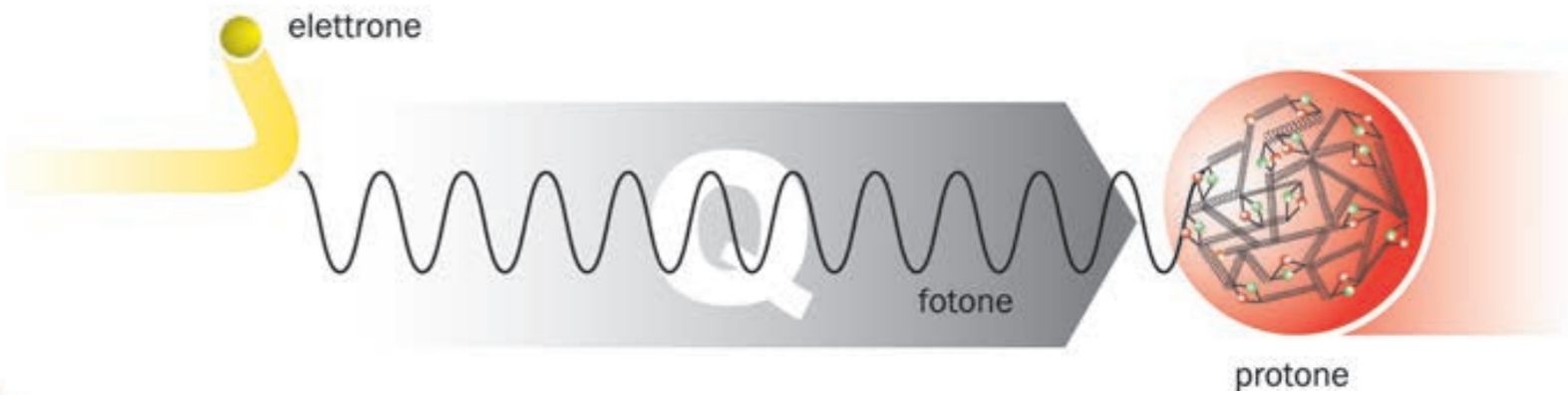
Collisione di due protoni



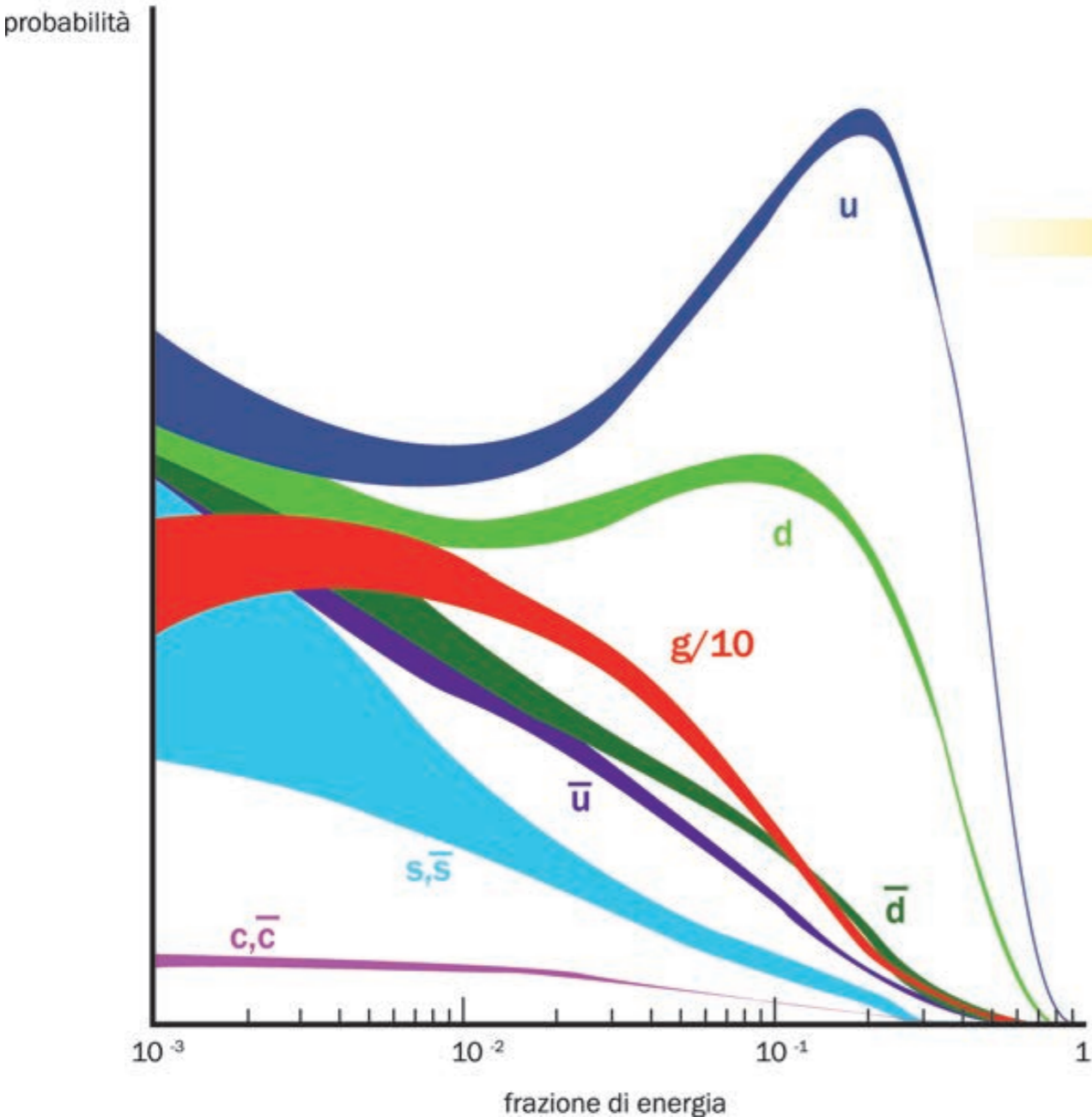
$$\sigma(s, \tau) = \sum_{AB} \int dx_1 dx_2 p_{1A}(x_1, Q^2) p_{2B}(x_2, Q^2) \sigma_{AB}(x_1 x_2 s, \tau)$$

sezione d'urto

Densita' di partoni

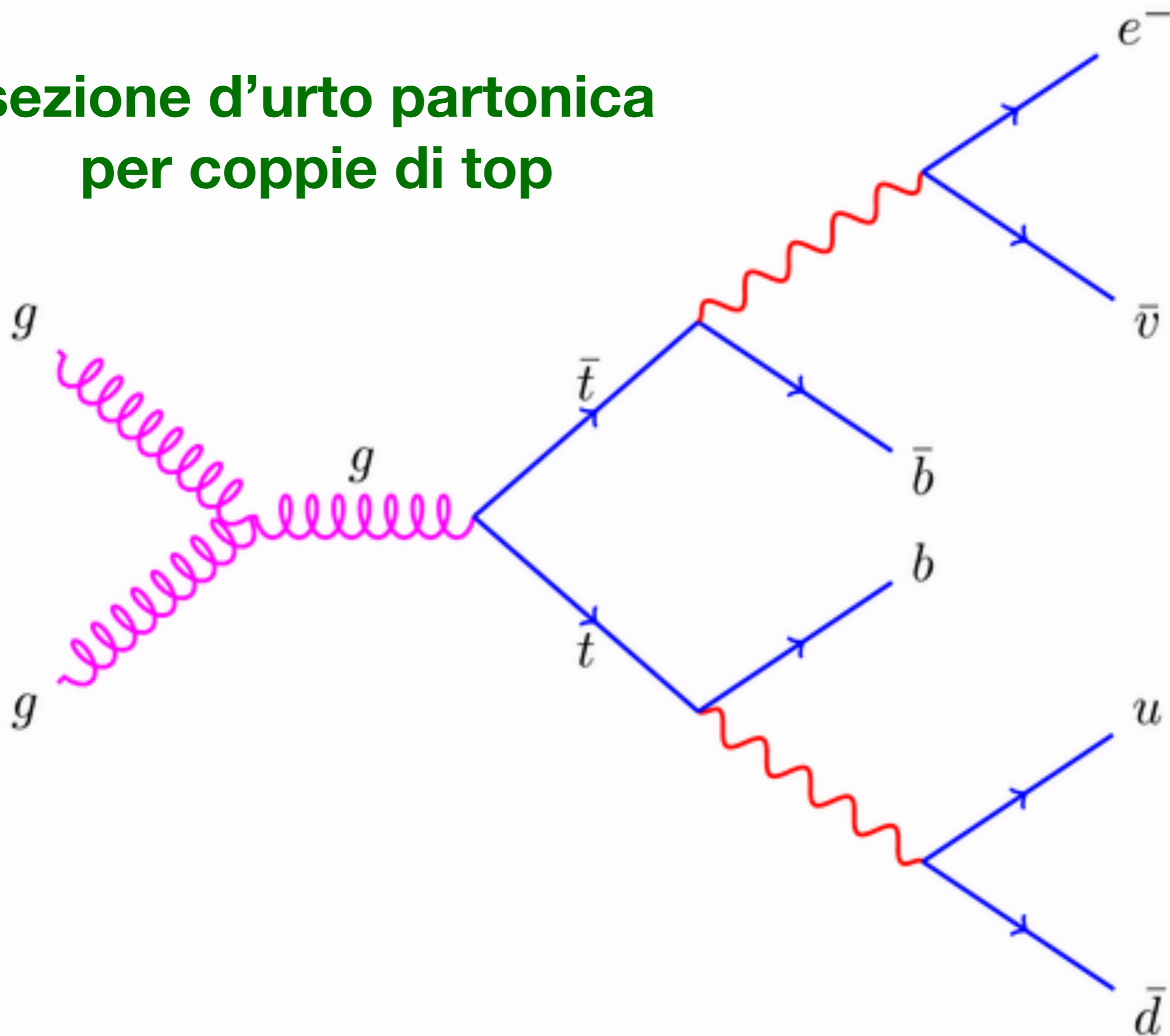


- u quark up
- \bar{u} antiquark up
- d quark down
- \bar{d} antiquark down
- c quark charm
- \bar{c} antiquark charm
- s quark strange
- \bar{s} antiquark strange
- g gluone

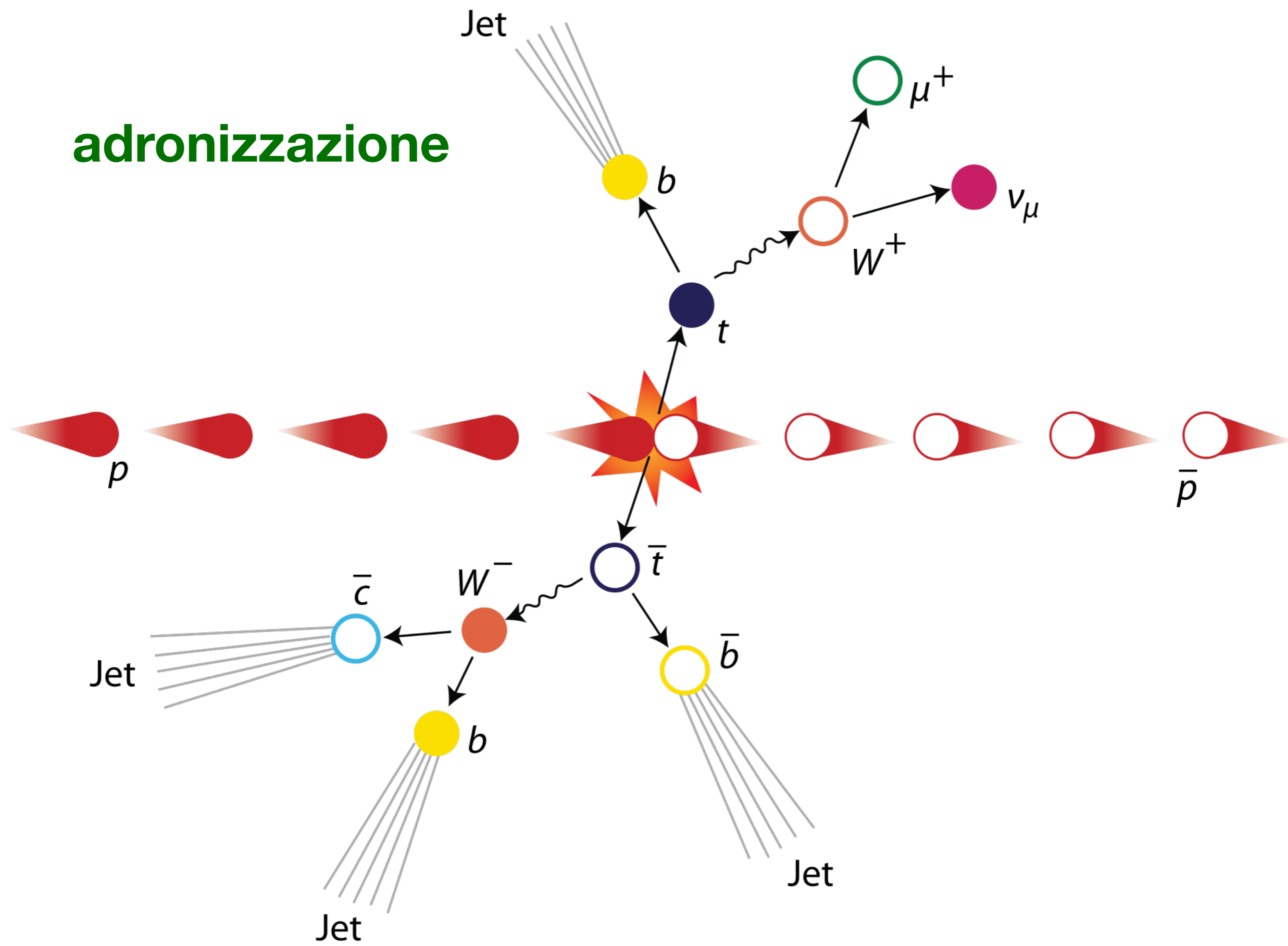


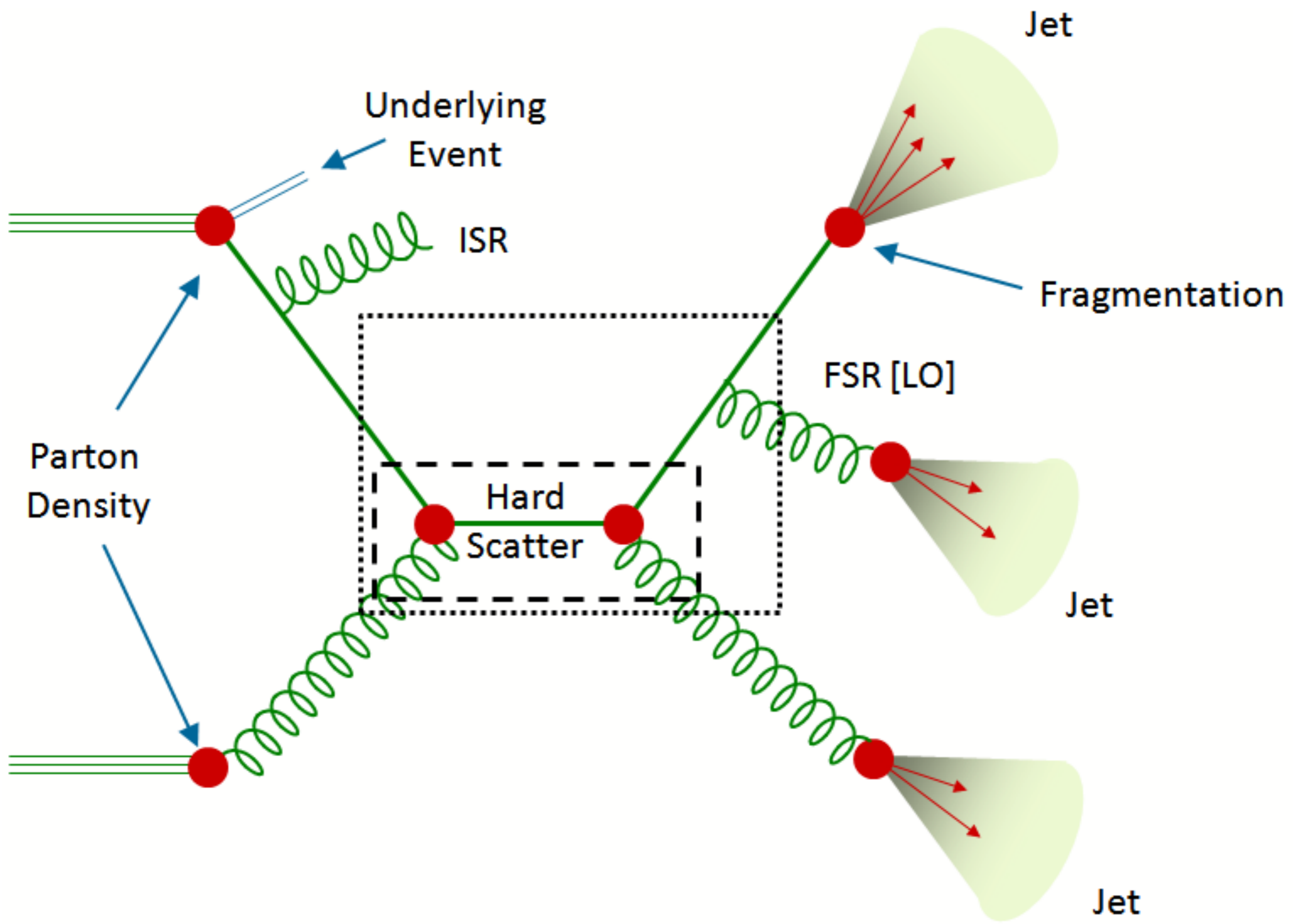
$$\sigma(s, \tau) = \sum_{AB} \int dx_1 dx_2 p_{1A}(x_1, Q^2) p_{2B}(x_2, Q^2) \sigma_{AB}(x_1 x_2 s, \tau)$$

sezione d'urto partonica per coppie di top

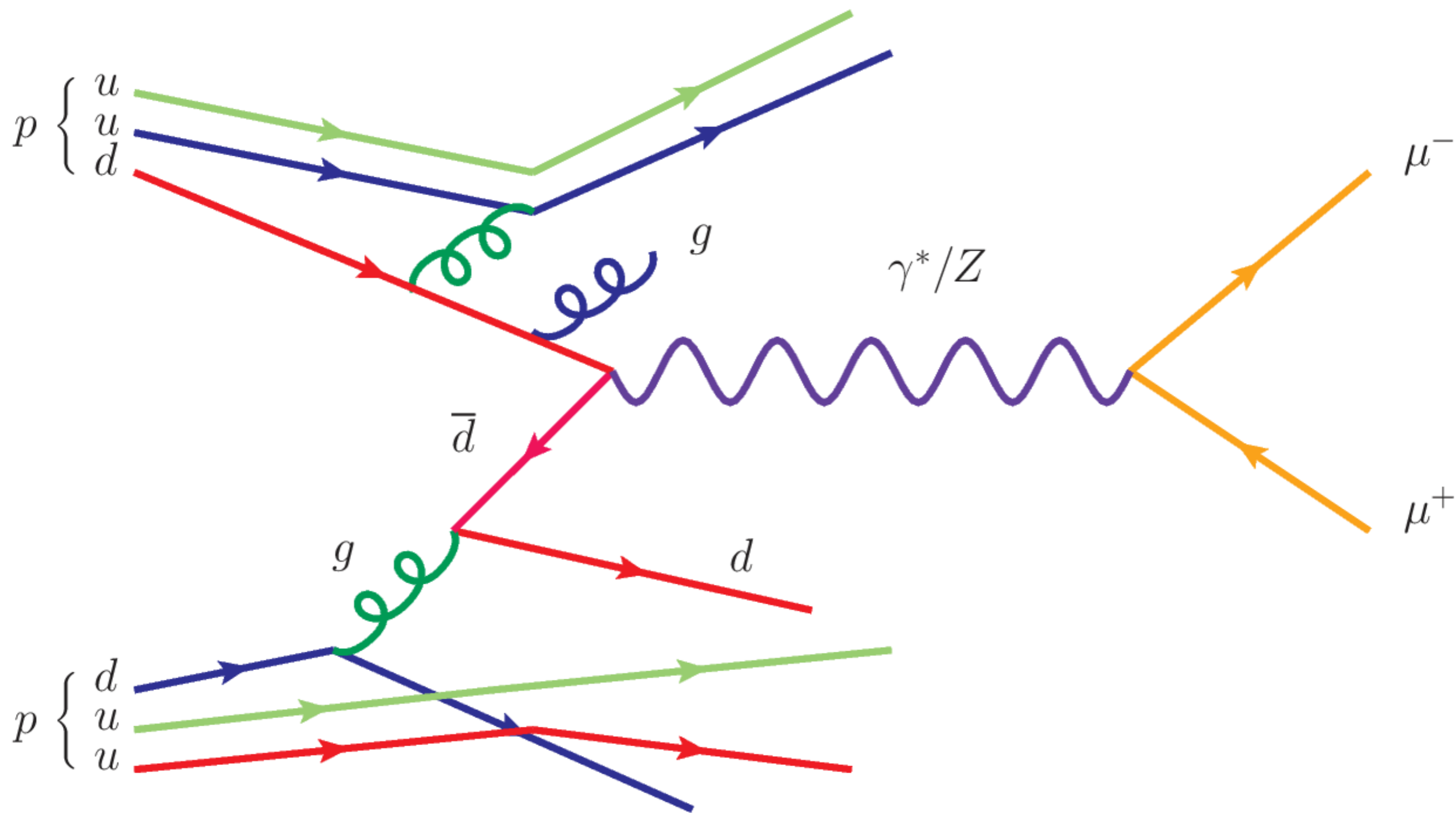


adronizzazione



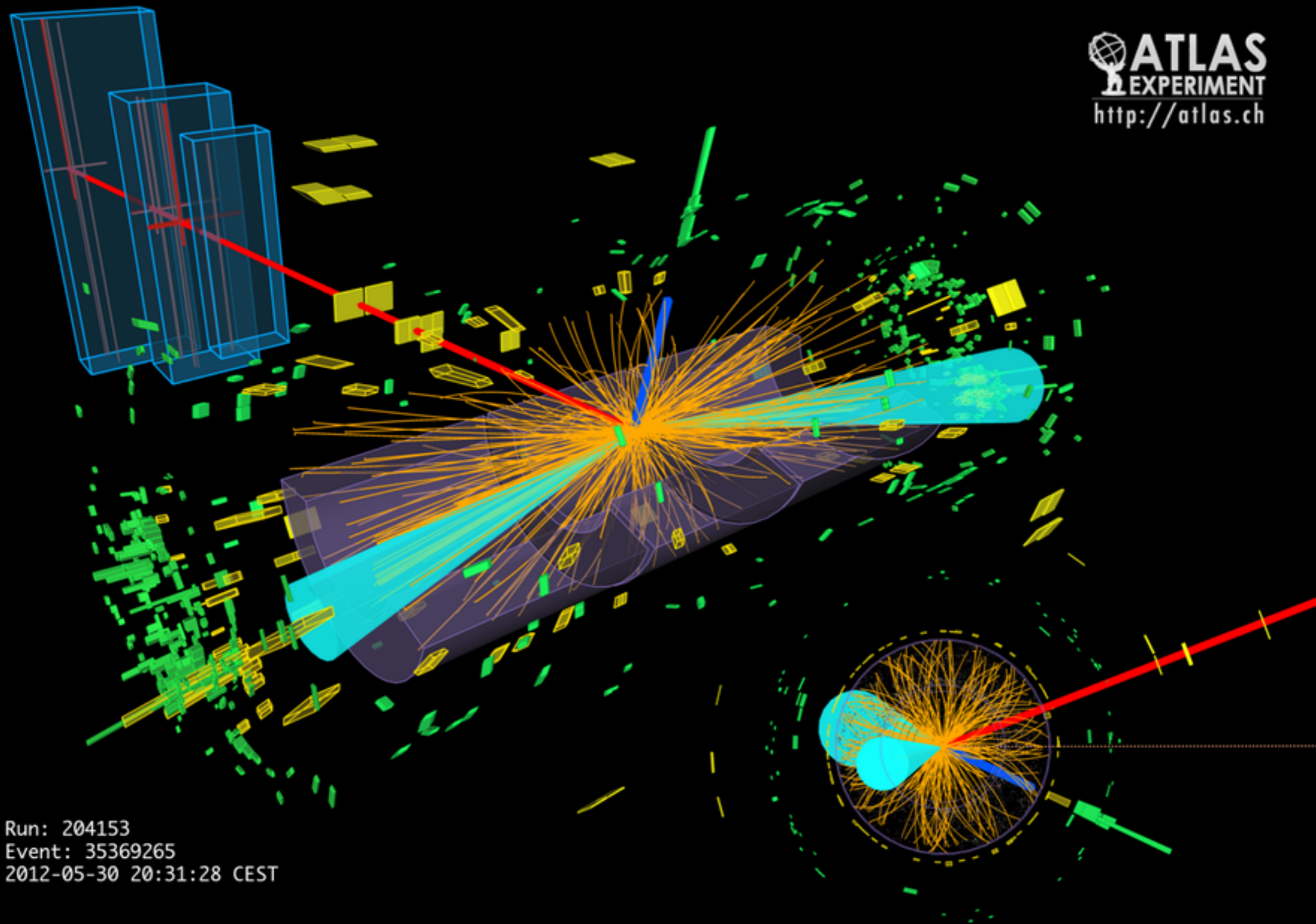


Produzione di $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



$(Z \rightarrow \mu^+ \mu^-) + (H \rightarrow \text{tau}^+ \text{tau}^-)$

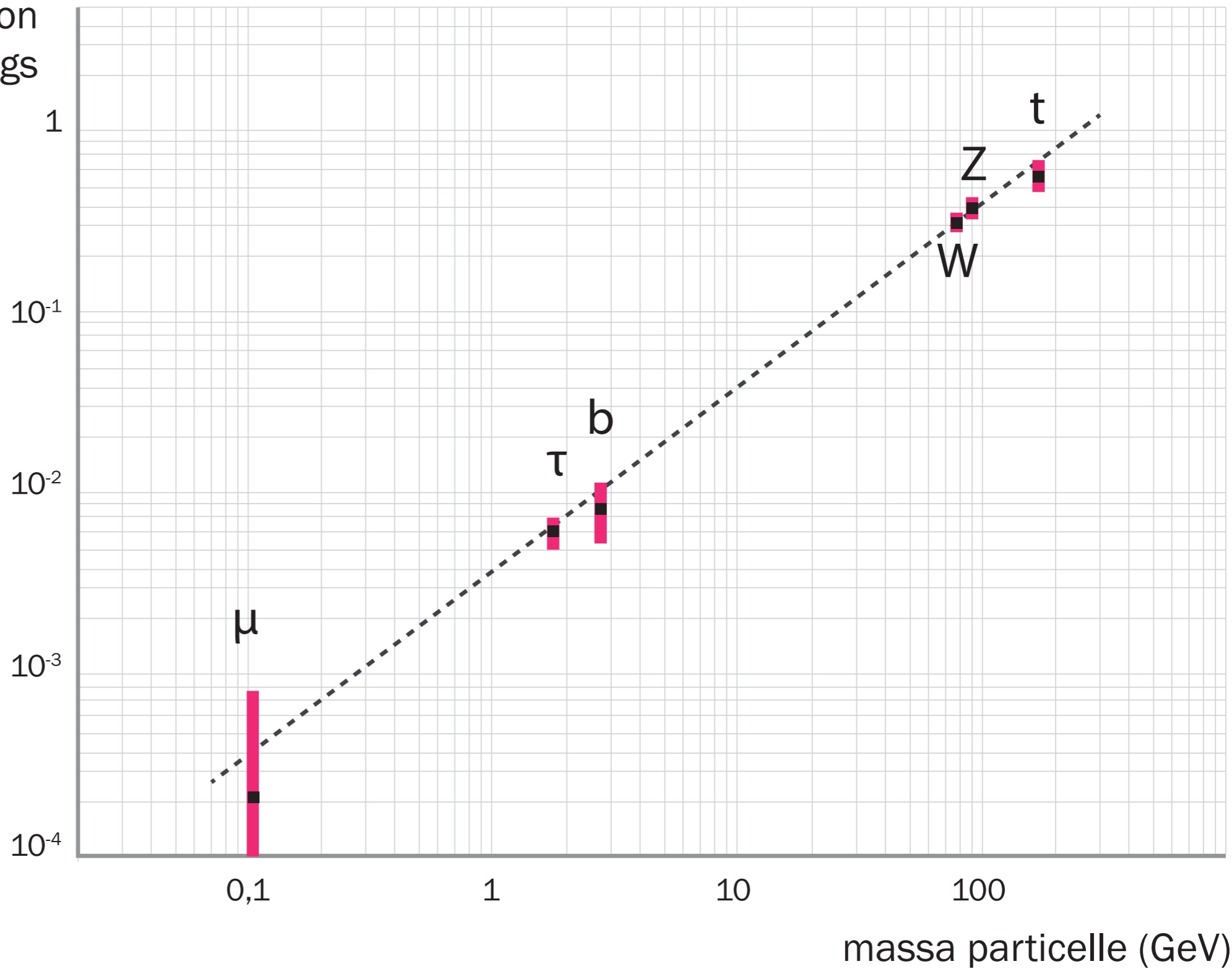

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



Run: 204153
Event: 35369265
2012-05-30 20:31:28 CEST

CMS

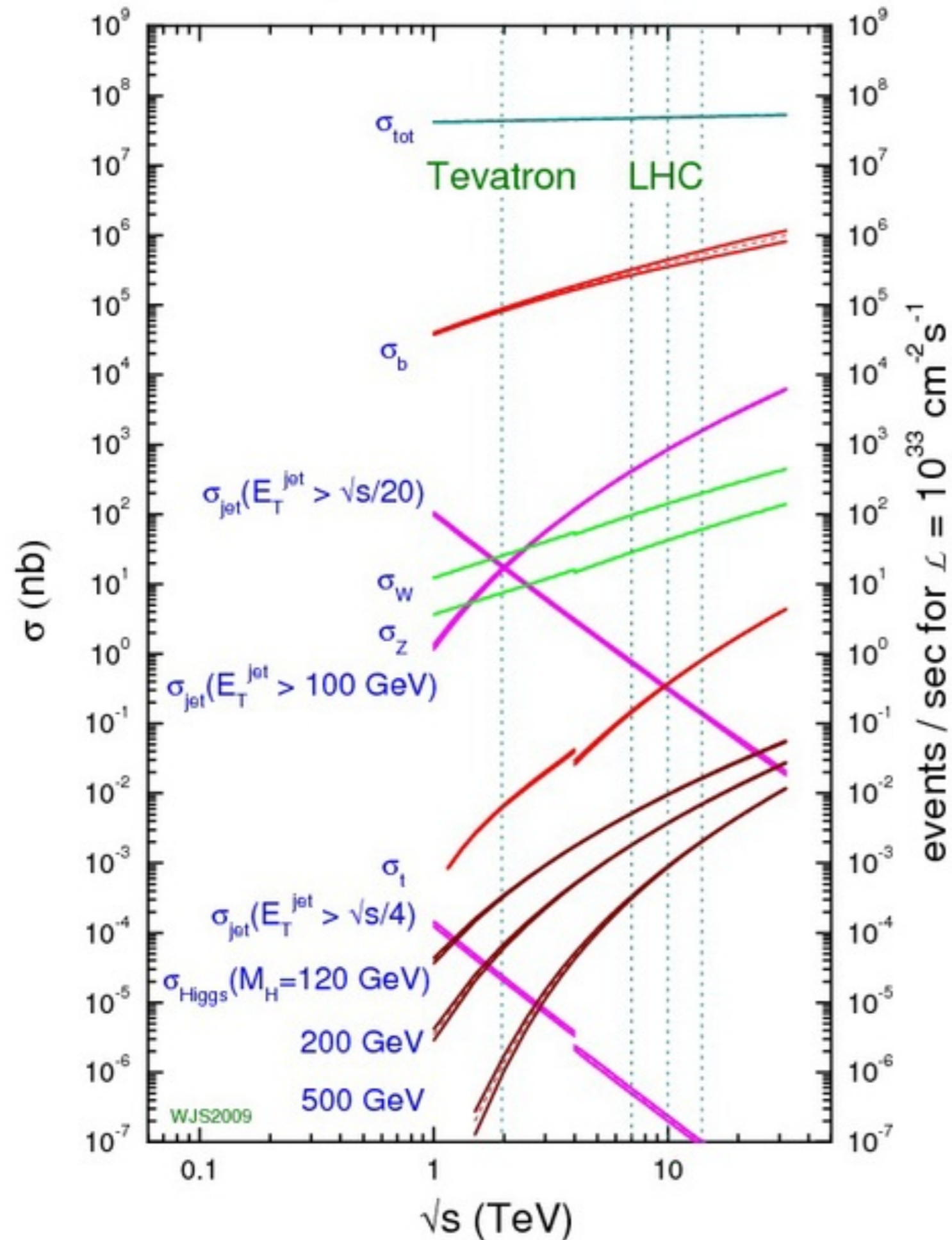
accoppiamento con
il bosone di Higgs



- W bosone W
- Z bosone Z
- t quark top
- b quark bottom
- τ tauone
- μ muone

**il bosone di Higgs si accoppia poco alle
particelle leggere !**

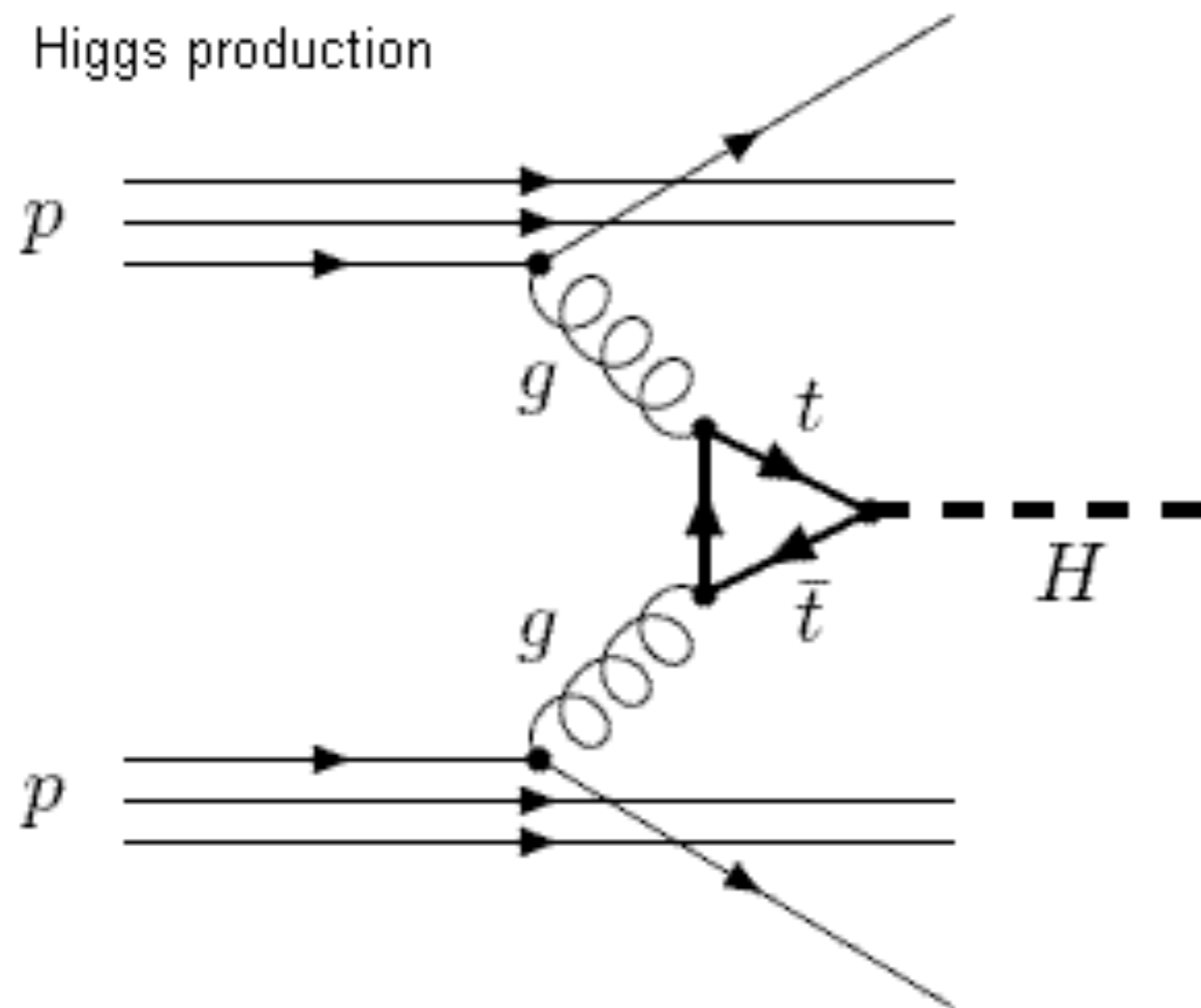
proton - (anti)proton cross sections



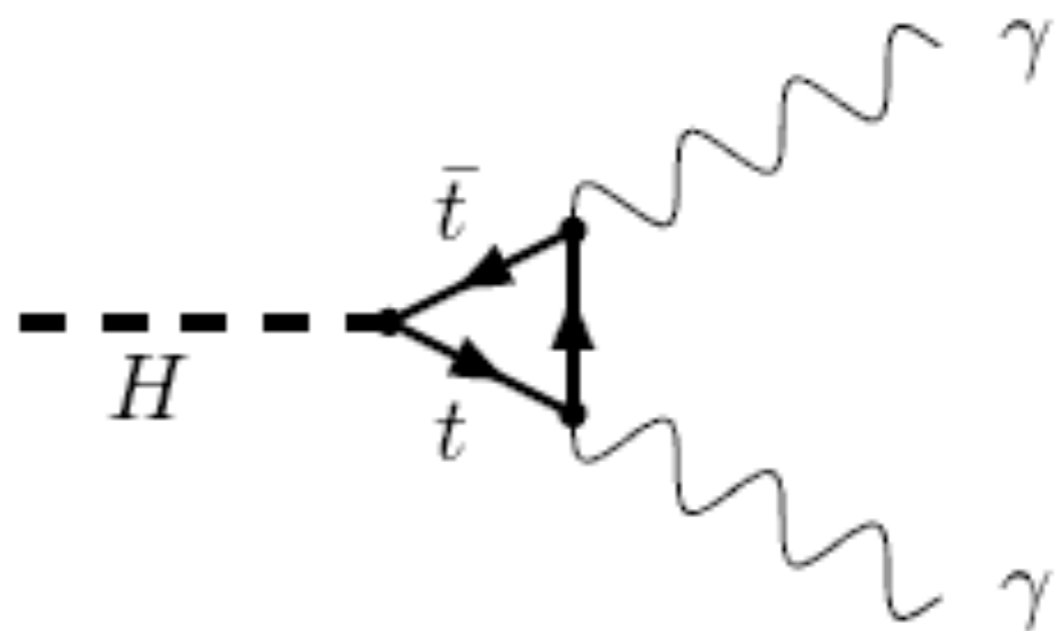
produzione del bosone di Higgs molto rara !

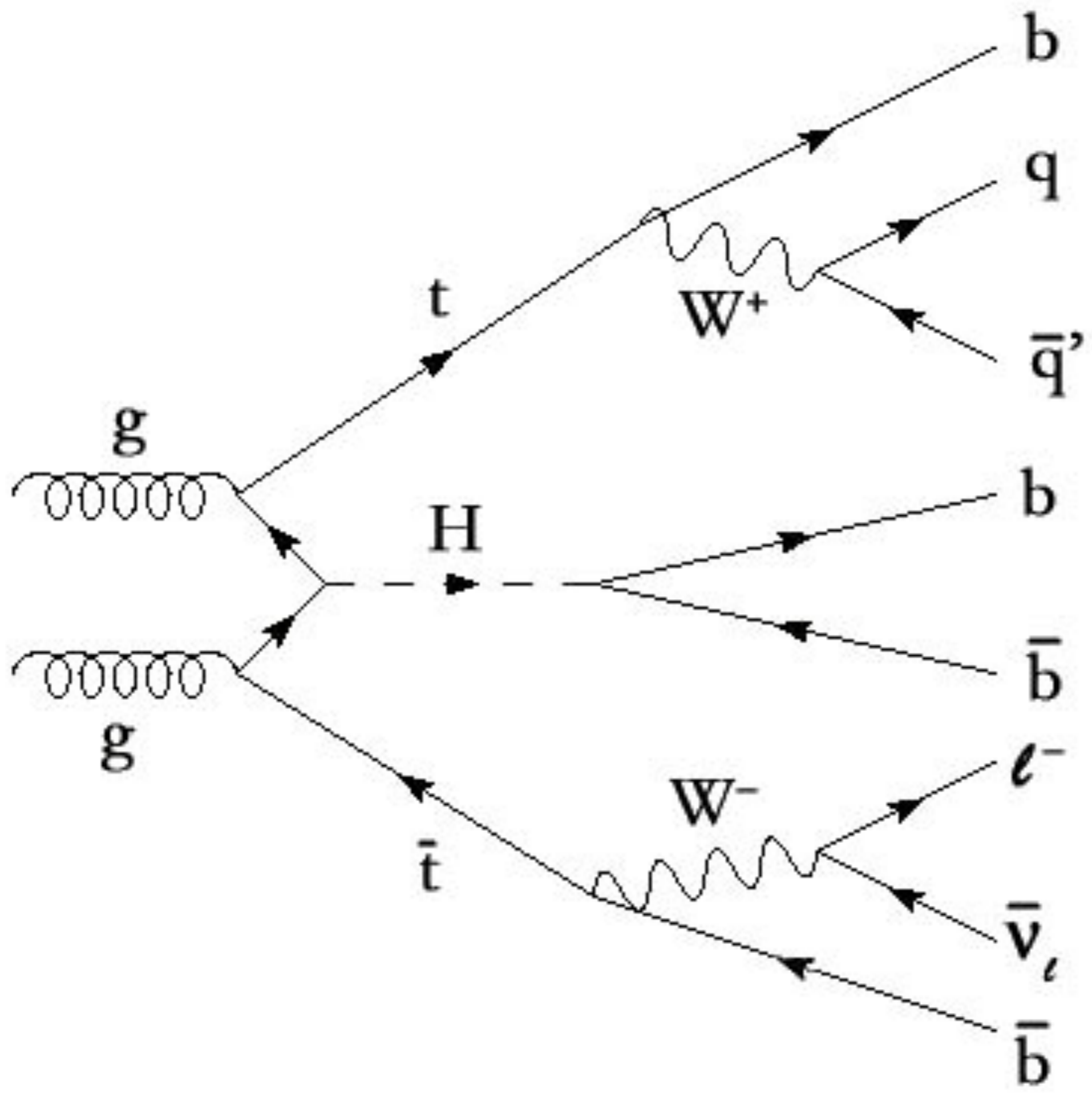
molto difficile distinguere dal fondo !

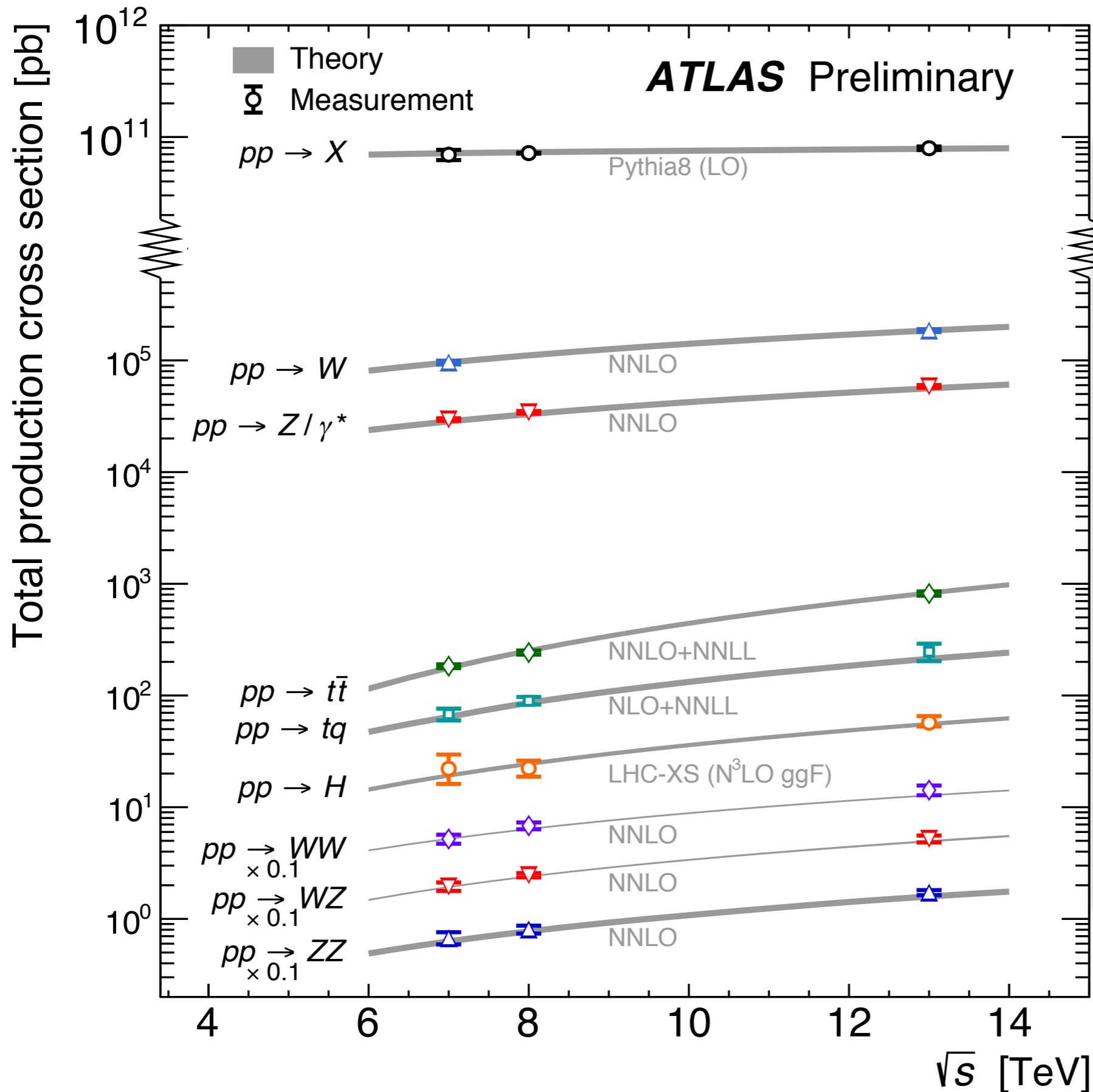
Higgs production



Higgs decay to photons







oggi il Modello Standard fornisce il linguaggio corretto per interpretare tutto l'insieme della fisica all' LHC !

* il Modello Standard ha pero' due tipi di problemi !!!

* esistenza di fenomeni "esterni" :

(teoria quantistica della) Gravita'

masse dei neutrini

Materia Oscura

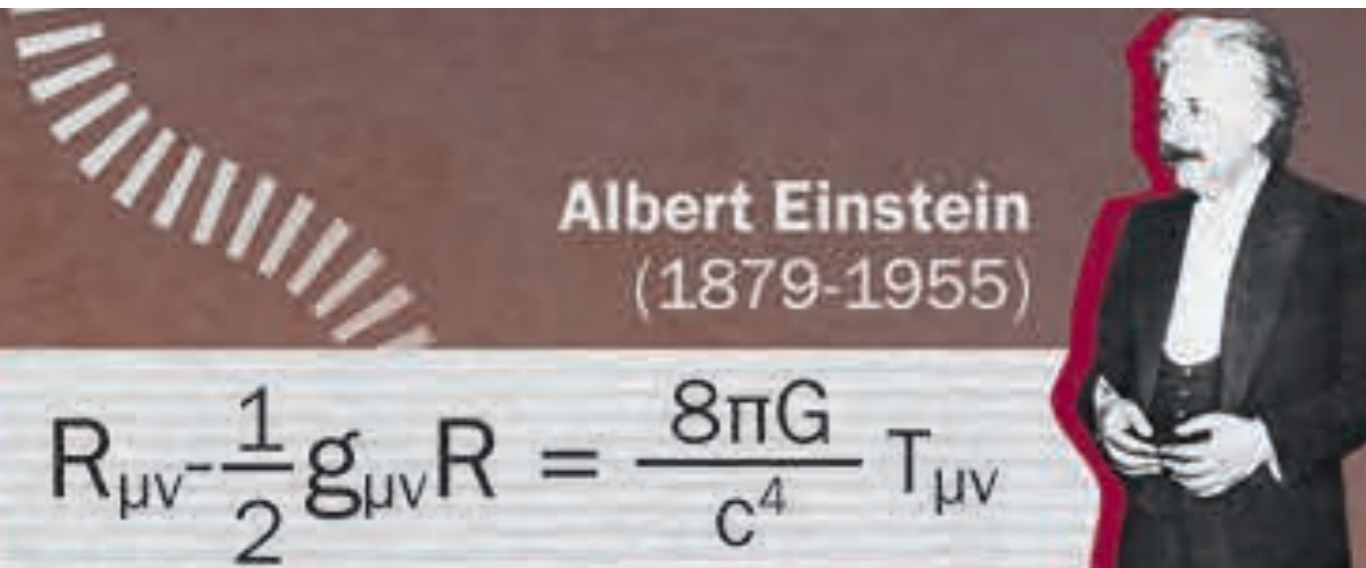
asimmetria materia-antimateria

* consistenza "interna"

connessa al settore
EWSB/Higgs

interazione gravitazionale ?

- non abbiamo ancora una descrizione quantistica della gravita' !
- **effetti quantistici sono importanti a distanze** $\Delta x \leq 10^{-33} cm$
corrispondenti all'energia : $E \sim M_{Planck} c^2 \sim 10^{19} GeV$
collegata alla costante di Newton : $G_N = \hbar c / M_{Planck}^2$

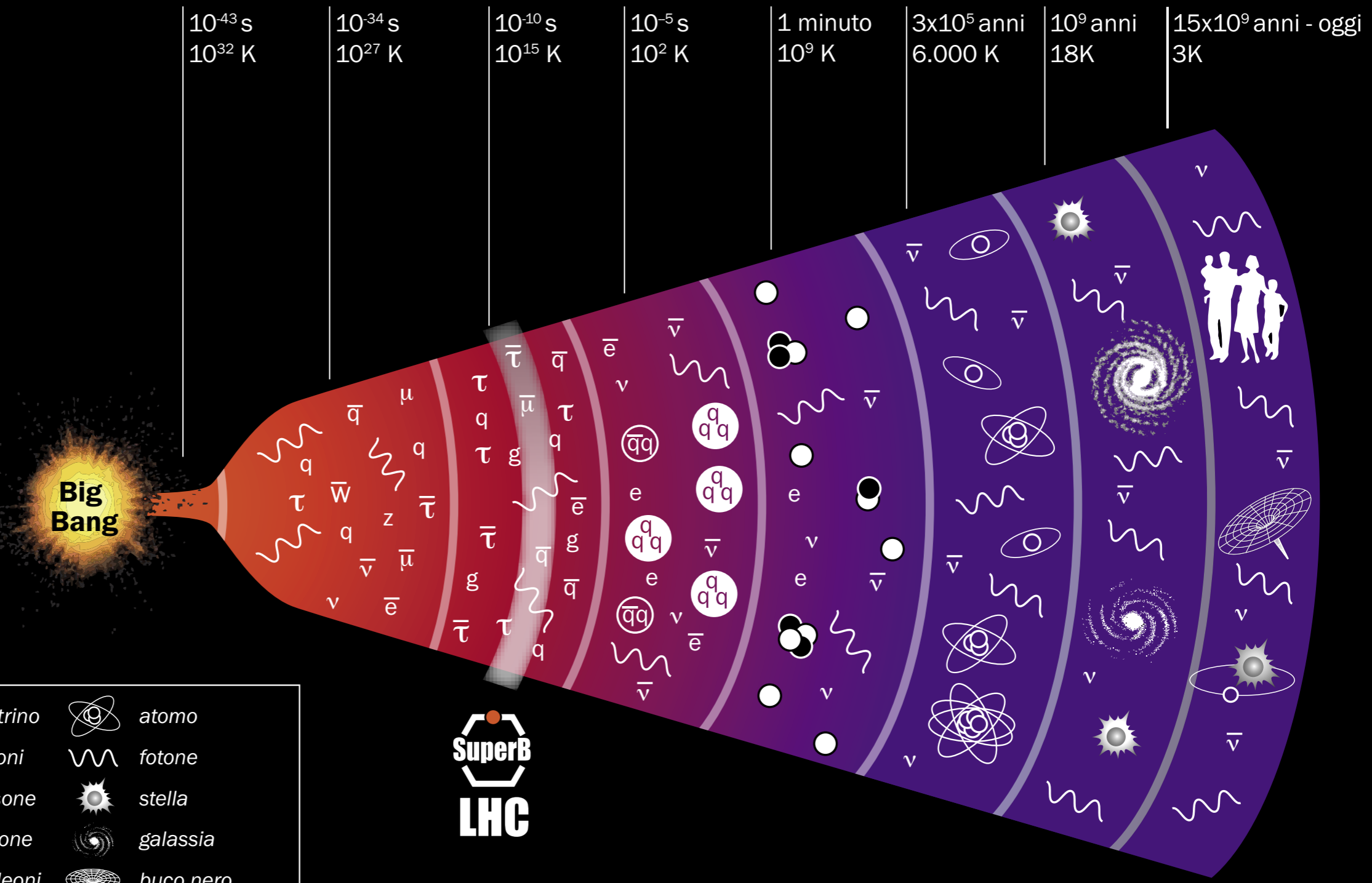


- particelle elementari non piu' puntiformi per $\Delta x \leq 10^{-33} cm$?
- oggetti estesi ???
- teoria delle stringhe ???

**connessione sempre piu' vasta
tra fisica delle alte energie e cosmologia**

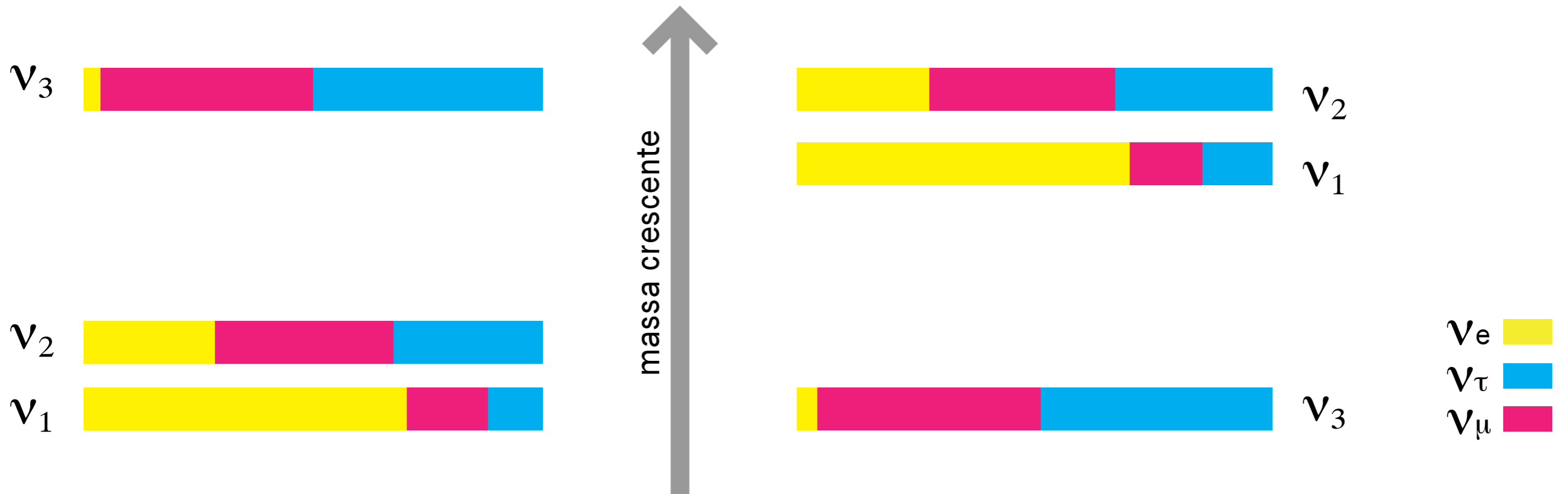
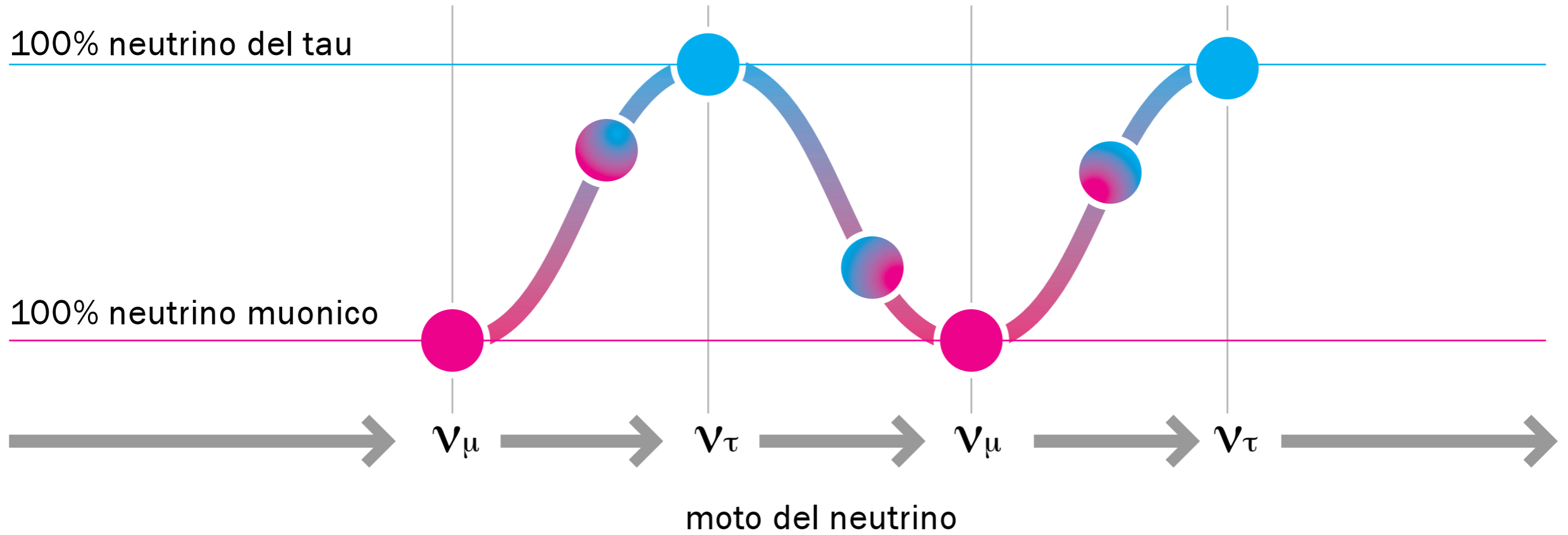
**Dai primi momenti dell'Universo, dopo il Big Bang,
la temperatura del fondo cosmico si è abbassata
gradualmente, da $kT \sim M_{\text{Planck}} c^2$
($k \sim 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$ costante di Boltzmann)
fino alla situazione attuale dove $T \sim 2.725^{\circ}\text{K}$.**

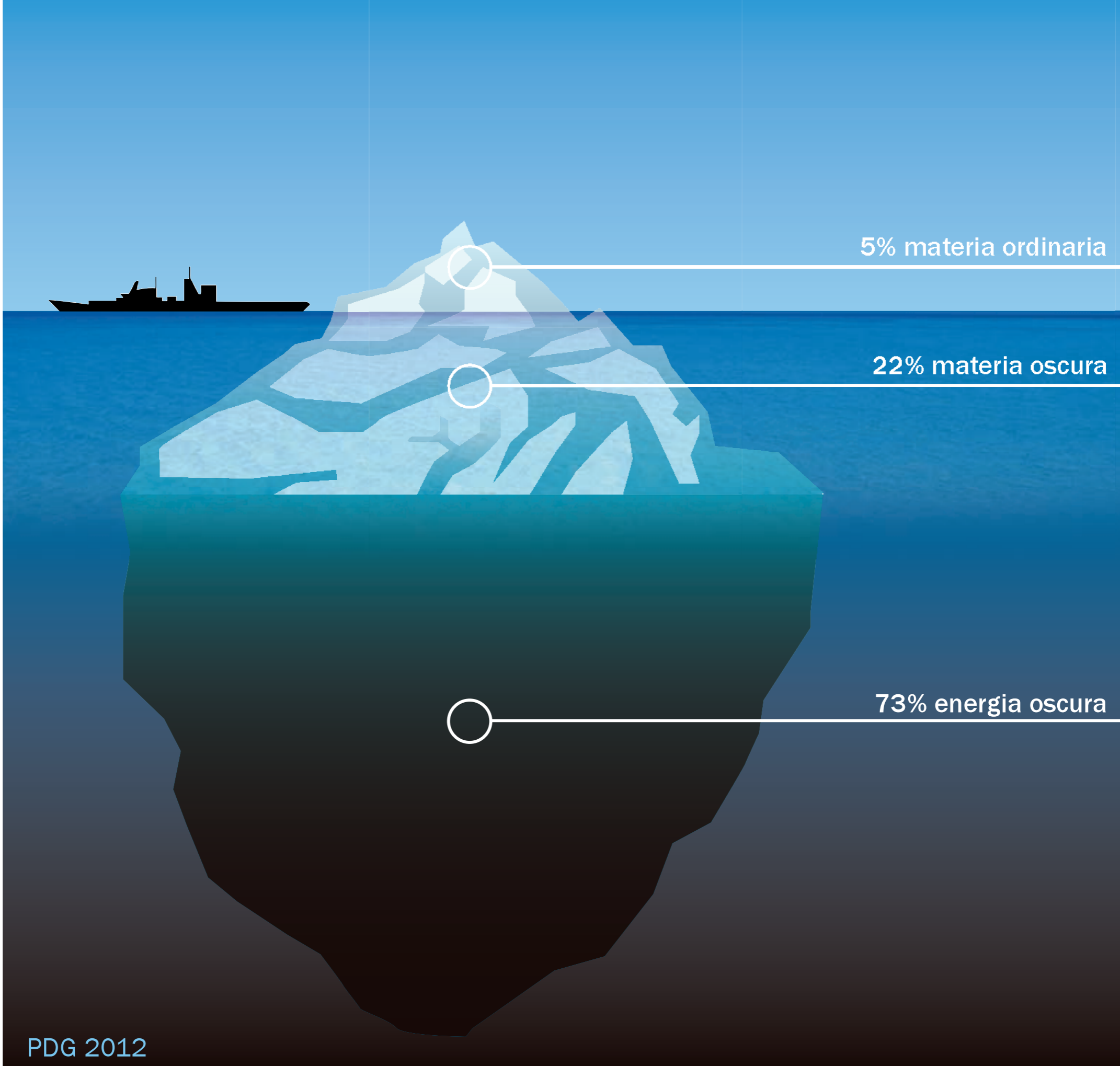
**>>> tutte le fasi della fisica delle alte energie dalla
teoria delle stringhe (al momento puramente speculativa)
fino alla fenomenologia del MS sono essenziali per
la ricostruzione dell'evoluzione dell'Universo a
partire dal Big Bang.**



q	quark	ν	neutrino		atomo
g	gluone	W, Z	bosoni		fotone
e	elettrone		mesone		stella
μ	muone		barione		galassia
τ	tau		nucleoni		buco nero

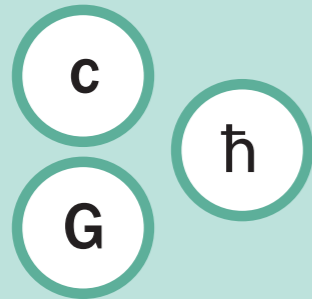






troppi parametri liberi nel MS ???

COSTANTI FONDAMENTALI



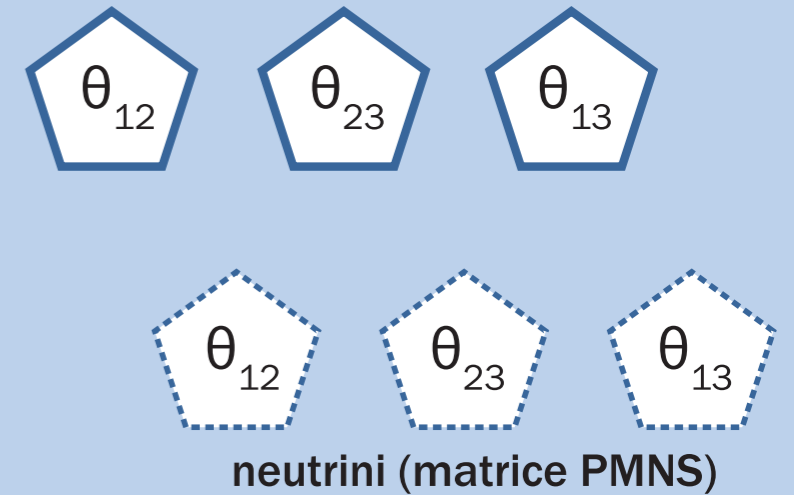
COSTANTI DI INTERAZIONE



MASSE

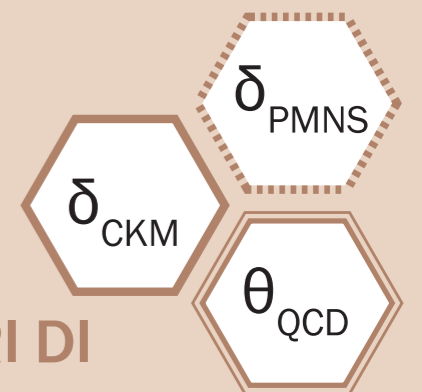


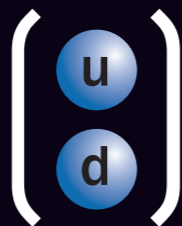
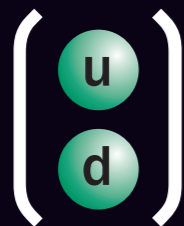
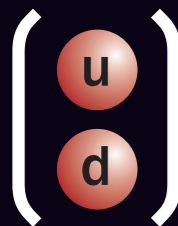
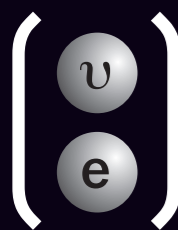
quark (matrice CKM)



ANGOLI DI MESCOLAMENTO

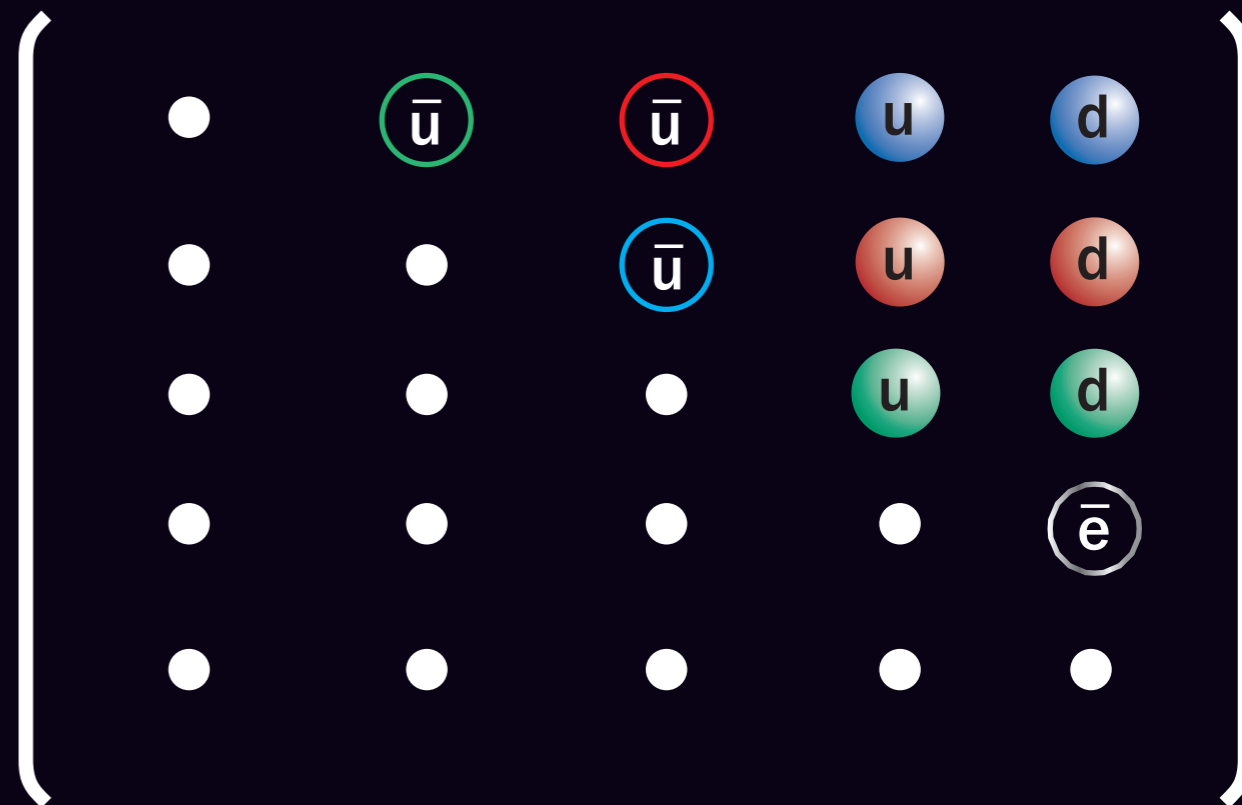
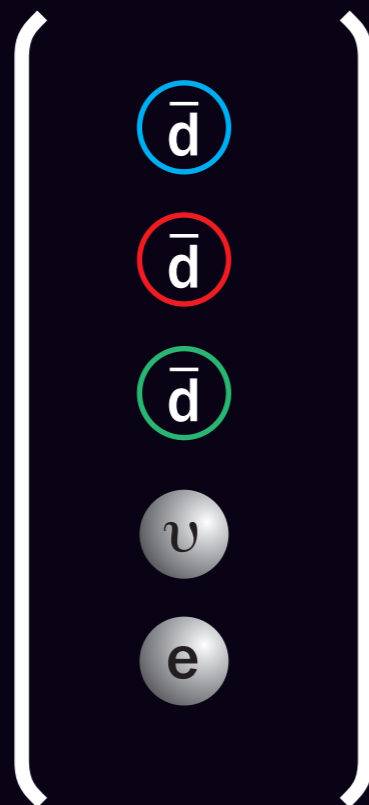
PARAMETRI DI VIOLAZIONE DI CP





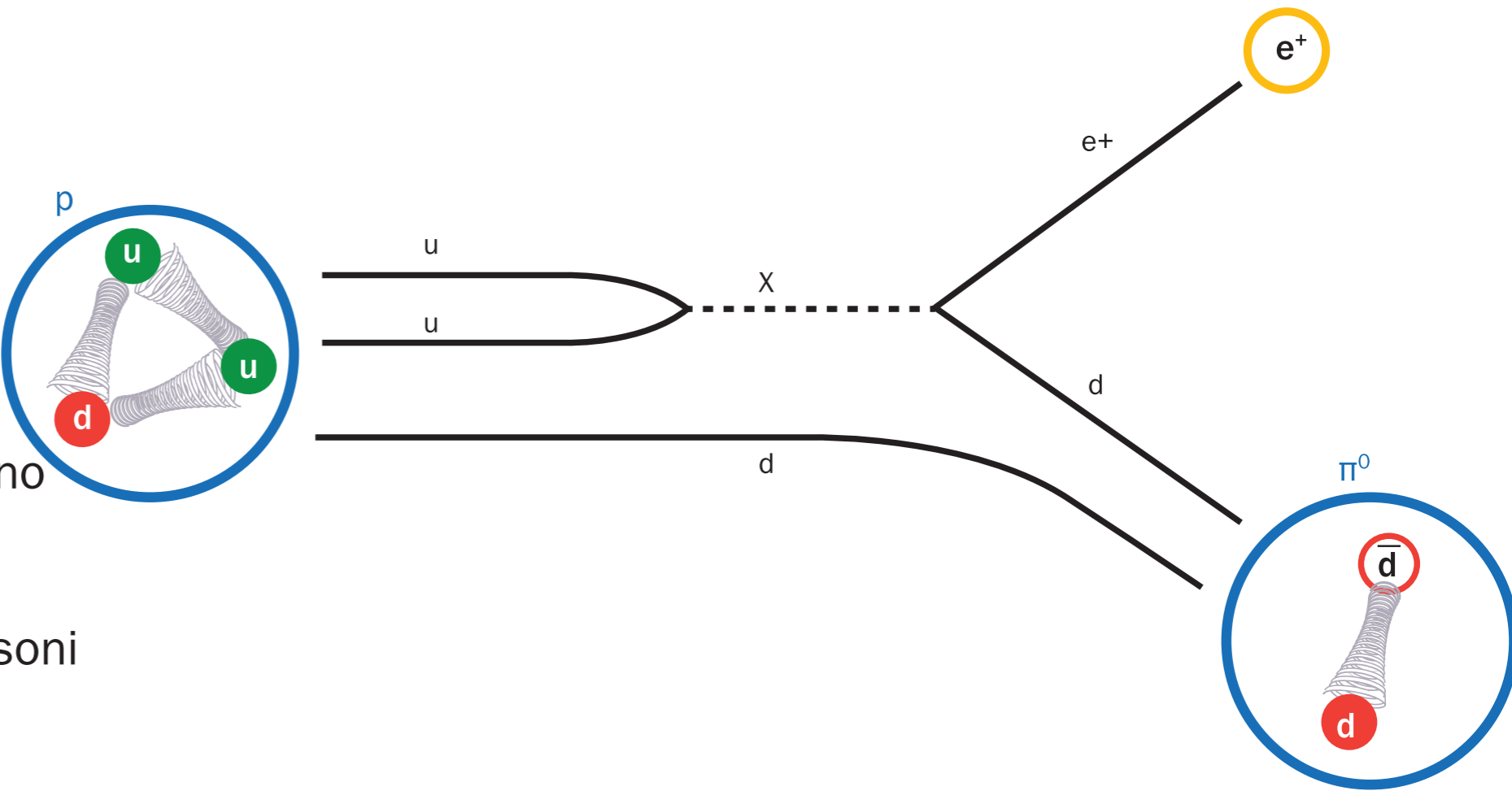
modello standard

GUT

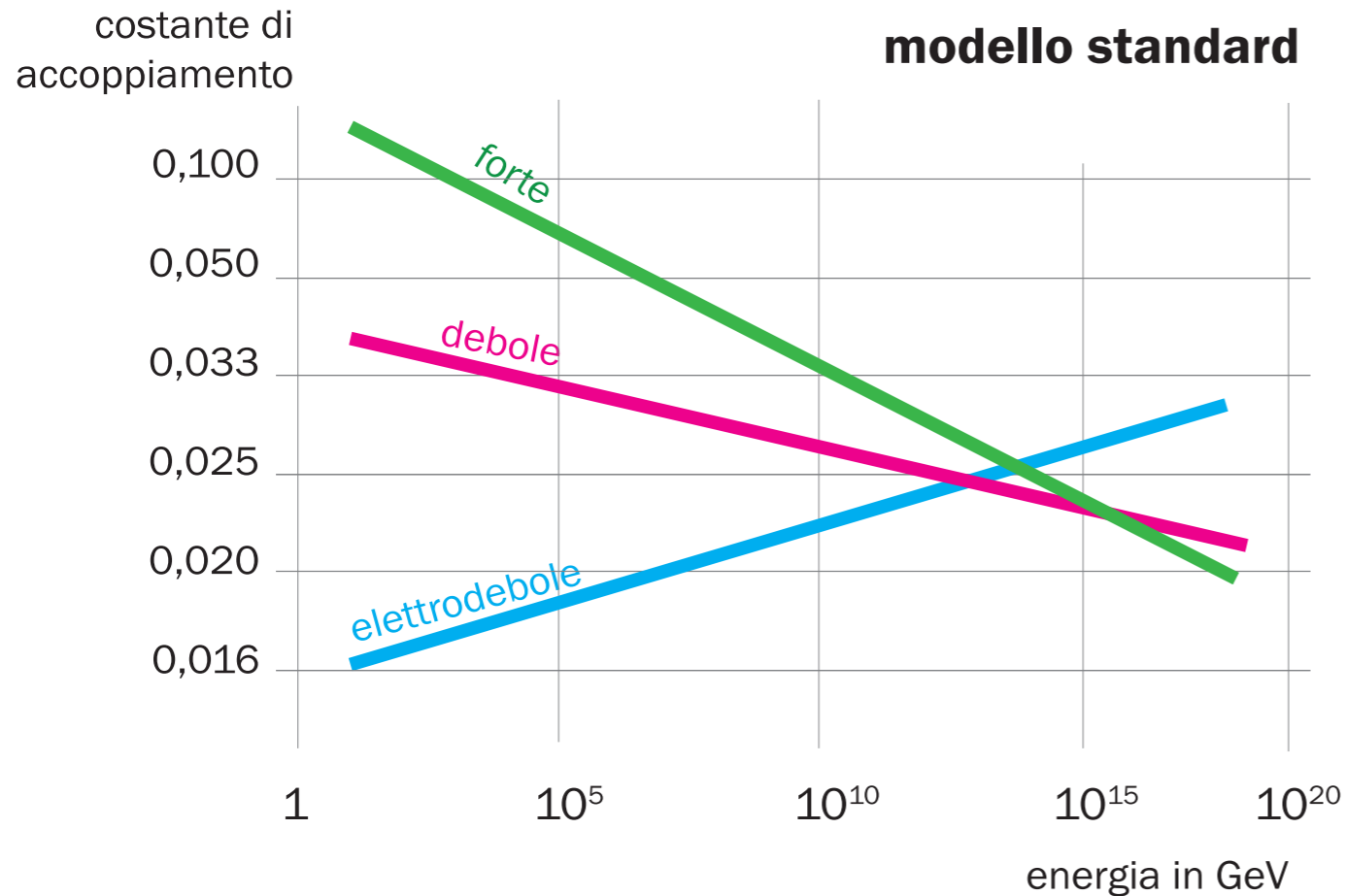


modello GUT SU (5)

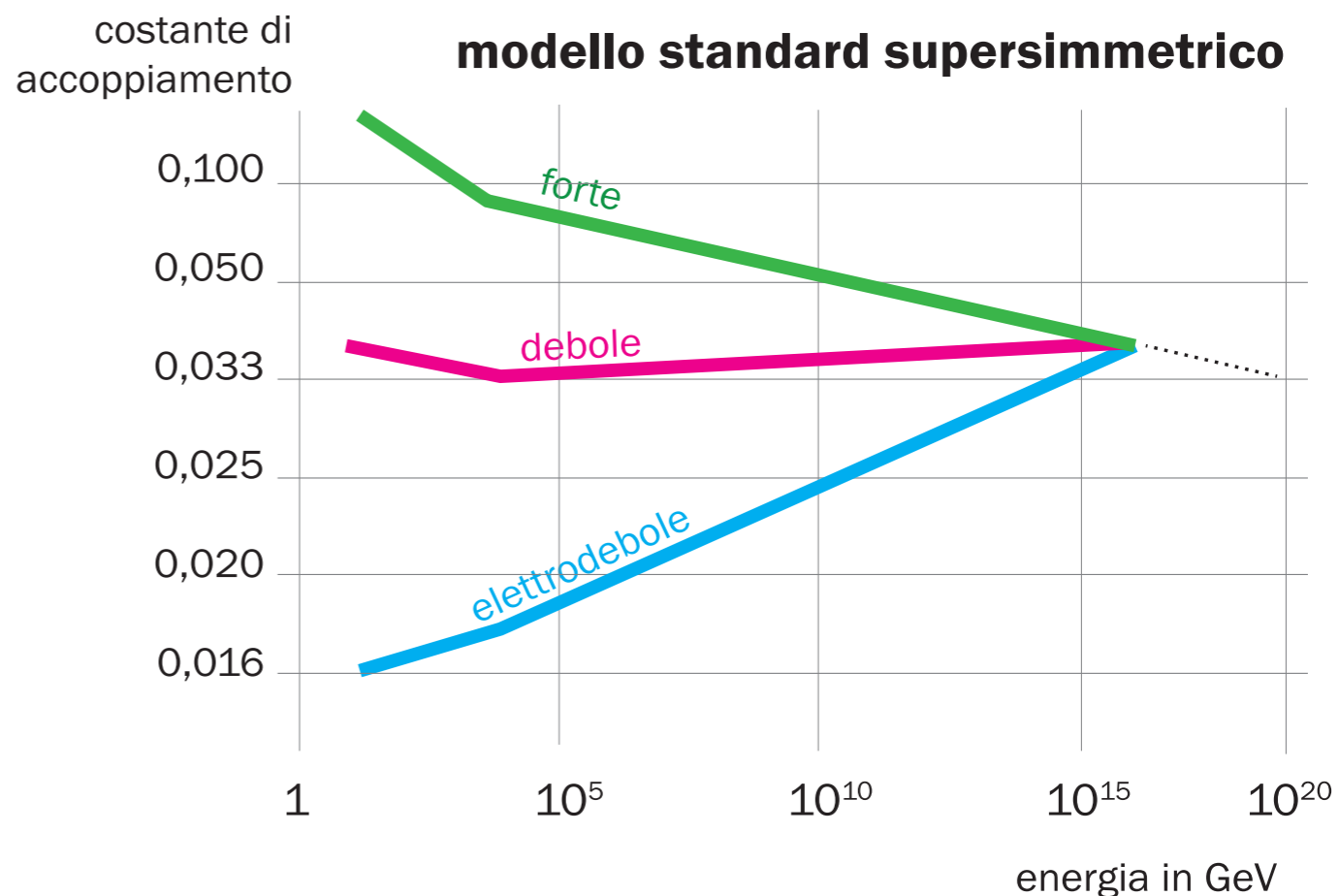
Il modello di Georgi-Glashow (uno dei modelli della Gut) prevede l'esistenza di una nuova forza mediata da due particelle, i bosoni X e Y, che accoppiano quark e leptoni. Il bosone X può essere prodotto, per esempio, dalla fusione di due quark up e decadere in un positrone e un antiquark down. Diventa quindi possibile la reazione rappresentata in figura, nella quale i due quark up del protone producono un X che poi decade in positrone e antiquark down. Quest'ultimo si ricombina col rimanente quark down del protone per formare un pione neutro. Questa reazione realizza quindi il decadimento del protone in un positrone e un pione neutro



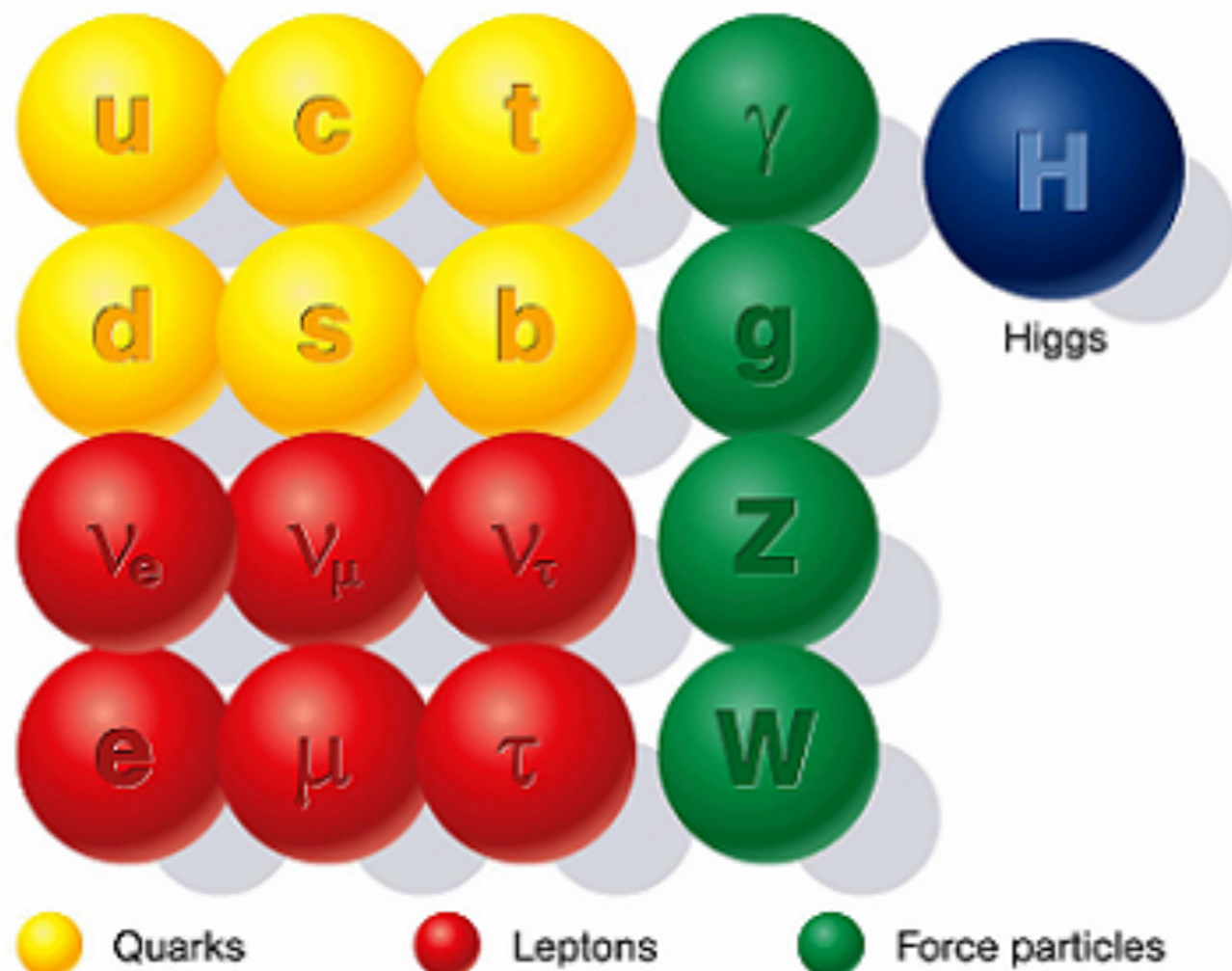
$$\tau_p > 1.67 \times 10^{34} \text{ anni !}$$



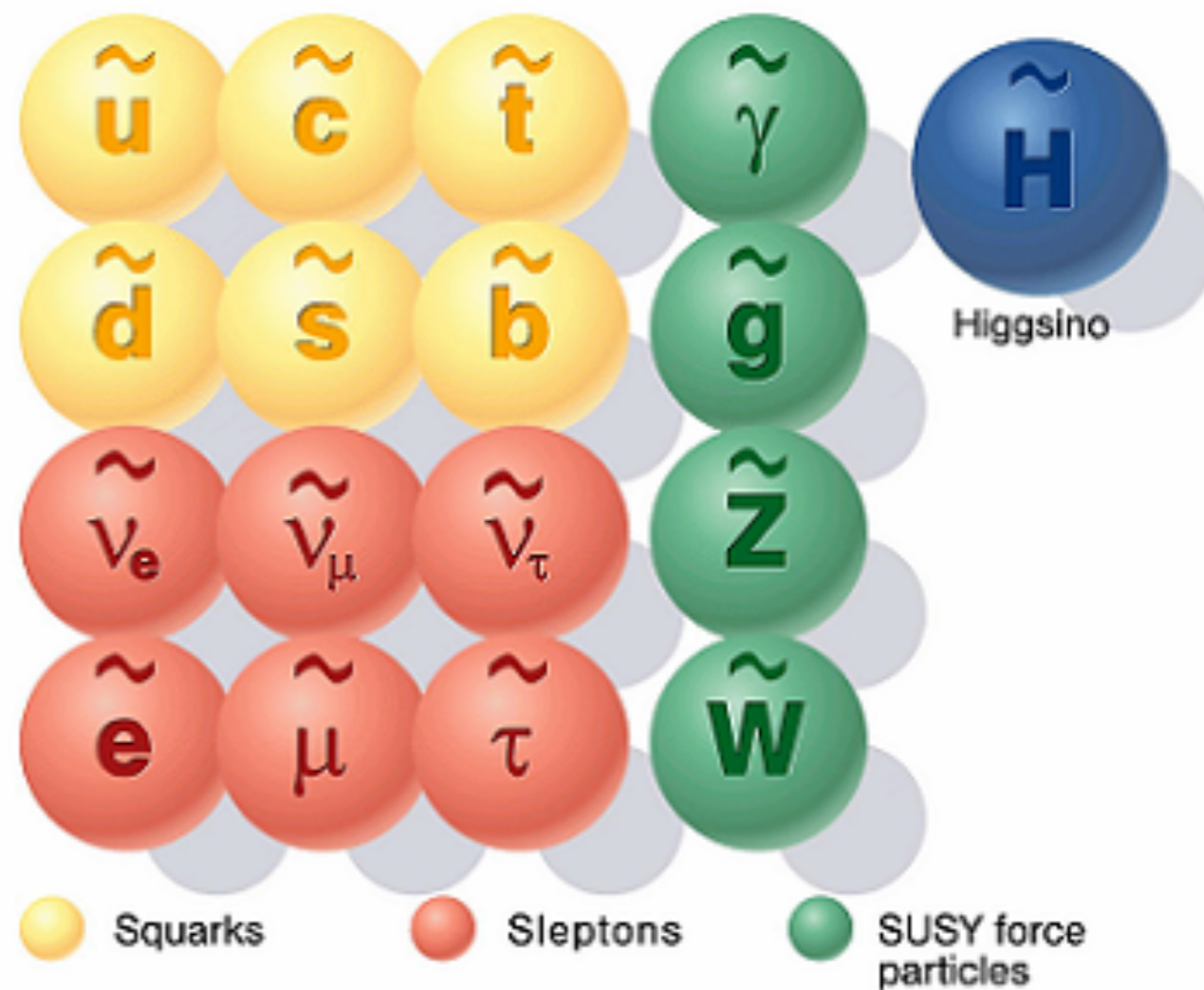
Le costanti di accoppiamento dell'interazione forte, debole ed elettromagnetica in funzione della scala di energia secondo il modello standard (a sinistra) e secondo il modello standard supersimmetrico minimale (a destra). Nel caso supersimmetrico le tre costanti di accoppiamento assumono lo stesso valore a una scala di energia di circa 10^{16} GeV, così come previsto negli scenari di grande unificazione.

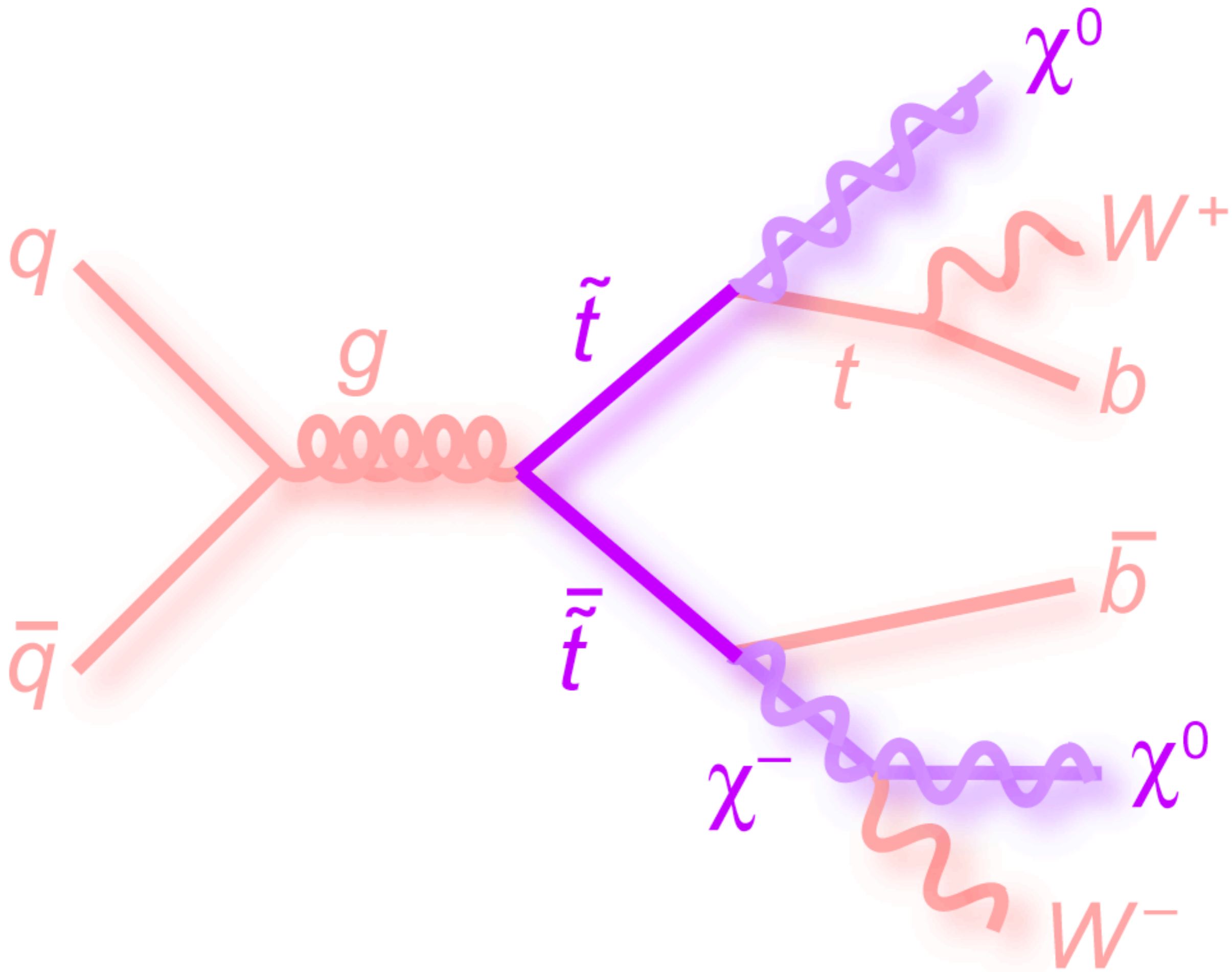


Standard particles



SUSY particles





**compito di LHC e dei prossimi
acceleratori e' cercare di capire
come il MS si modifica per
spiegare cio' che oggi non riusciamo
a spiegare ...**

4 strade principali

tutte di fondamentale importanza !

* Higgs

* nuove particelle

* segnali elusivi

* effetti indiretti

